UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Implementación de un banco de pruebas de bajo costo para la realización de prácticas remotas en Electrónica de Potencia, enfocado hacia IoT y utilizando código abierto.

Sergio Andrés Diaz Carmona

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Magíster en Ingeniería

Directora
Melisa de Jesús Barrera Durango, Doctora (PhD)

Codirector
Juan Bernardo Cano Quintero, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Cita	Diaz Carmona [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] S.A. Diaz Carmona, “Implementación de un banco de pruebas de bajo costo para la realización de prácticas remotas en Electrónica de Potencia, enfocado hacia IoT y utilizando código abierto”, Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2025.



Maestría en Ingeniería.

Grupo de Investigación Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL).

Sede de Investigación Universitaria (SIU).



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mi madre y mi familia, quienes siempre han estado conmigo para aconsejarme, apoyarme y me han alentado a seguir adelante; es por ellos que he llegado hasta acá.

De la misma manera agradezco a todos quienes han sido mis maestros y formadores, especialmente a los profesores Orlando Carrillo Perilla y Pedro Vicente Leal Pérez (Q.E.P.D), quienes han hecho parte esencial de mi formación como profesional, como docente y como persona.

También doy las gracias a los ingenieros Andrés Sánchez, Nelson Benítez, y Robinson Ortiz quienes acompañaron parte de este proceso en su recomendaciones y sugerencias. A los asesores, quienes me brindaron sus conocimientos y orientaciones pertinentes para el desarrollo del mismo.

Contenido

Resumen 4
Abstract 5
Objetivos 6
Objetivo general 6
Objetivos específicos 6
Introducción 7
Capítulo 1: Estado del arte. 9
Capítulo 2: Marco teórico 17
2.1 Internet de las cosas IoT 17
2.1.1 Dispositivo final: 17
2.1.2 Conectividad: 18
2.1.3 Protocolos de comunicación: 18
2.1.4 *Gateway*: 19
2.1.5 Protocolos de comunicación IoT 20
2.1.6 Servicios IoT 21
2.1.7 Node Red 22
2.2 Electrónica de potencia 23
2.2.1 Circuitos fundamentales en electrónica de potencia 23
2.2.1.1 Convertidores AC-DC 23
2.2.1.2 Convertidores AC-AC 24
2.2.1.3 Convertidores DC-DC 25
2.2.1.4 Convertidores DC-AC 25
2.2.2 Elementos semiconductores de potencia 26
2.2.2.1 Tiristores 26
2.2.2.2 MOSFET 28
2.2.2.3 IGBT 29
Capítulo 3: Descripción general de la solución propuesta. 30
3.1 Implementación de la solución propuesta. 33
3.1.1 Módulos de práctica: 34
3.1.1.1 Módulo de control por fase: 34
3.1.1.2 Módulo de control de velocidad de un motor DC: 39
3.1.1.3 Módulo convertidor DC-DC tipo *buck*: 46

3.1.2 Tarjeta maestra: 51
3.1.3 Servidor Local: 56
3.1.3.1 Configuración de red: 57
3.1.3.2 Servicios de red: 58
Control de Raspberry: 58
Control por fase: 59
..... 59
Control de velocidad: 60
Convertidor DC-DC: 61
3.1.4 Servicios en la nube: 62
3.1.4.1 VPS 62
3.1.4.2 *Broker* MQTT 64
3.1.4.3 Node-Red 65
3.1.5 Interfaz web 67
Capítulo 4: Pruebas y ajustes 73
4.1 Calibración del módulo de control por fase 73
4.2 Calibración del módulo de control de velocidad de un motor DC 76
4.3 Calibración del módulo convertidor DC-DC tipo *buck* 78
4.4 Discusión de resultados 82
4.5 Rendimiento del sistema 84
5. Conclusiones 86
6. Trabajos futuros 88
7. Anexos 89
7.1 Código de programación microcontroladores 89
7.1.1 Tarjeta del módulo de control por fase 89
7.1.2 Tarjeta del módulo de control de velocidad de un motor DC 90
7.1.3 Tarjeta del módulo convertidor DC-DC tipo BUCK 91
7.2 Banco de preguntas 93
7.2.1 Módulo de control por fase: 93
7.2.2 Módulo de control de velocidad de un motor DC: 95
7.2.3 Módulo convertidor DC-DC tipo *buck*: 97
8. Referencias 100

Resumen

En este trabajo se desarrolló un banco de pruebas para prácticas remotas en el ámbito de electrónica de potencia. El sistema amplía la cobertura para los estudiantes que no pueden participar presencialmente y está enfocado a mejorar su atención. Además, el dispositivo se diseñó para mitigar los riesgos de las prácticas de laboratorio. La implementación del sistema se ejecutó mediante software de código abierto y dispositivos orientados al Internet de las Cosas (IoT). La selección de componentes y equipos se realizó de manera cuidadosa, considerando criterios como óptimo desempeño, versatilidad, confiabilidad, bajo costo, disponibilidad y facilidad de adquisición (según el mercado).

El estudiante accede al banco de pruebas a través de una plataforma web que le permite la autenticación mediante un nombre de usuario y una contraseña. La aprobación de un breve examen de conocimientos previos habilita el acceso a uno de los tres módulos de práctica disponibles: control por fase, control de velocidad de un motor DC mediante la técnica de PWM y un convertidor DC-DC de tipo Buck. La plataforma se comunica a través de un servicio IoT con un servidor local implementado en un microcomputador de bajo costo que utiliza un sistema operativo de distribución libre; este a su vez está conectado a una tarjeta maestra que se encarga de comunicarse con los módulos de cada práctica, enviando los datos correspondientes para el ajuste de los parámetros inherentes a la práctica, así como la visualización en tiempo real de las variables asociadas.

El diseño de este banco de pruebas se caracteriza por su arquitectura abierta y escalable, lo que significa que está preparado para integrar nuevos módulos y tecnologías a medida que los cursos y las necesidades educativas evolucionan. Esta flexibilidad permite una adaptación del sistema para prácticas remotas en laboratorios de diversos cursos relacionados con la electrónica.

Palabras claves: Prácticas remotas, IoT, Electrónica de potencia, Convertidor DC-DC tipo *Buck*, Control por fase, *Chopper*, Código abierto.

Abstract

In this work, a test bench was developed for remote practices in the field of Power Electronics. The system extends coverage for students who cannot participate in person and is focused on improving their attention. In addition, the device was designed to mitigate the risks of laboratory practices. The system implementation was executed using open source software and Internet of Things (IoT) oriented devices. The selection of components and equipment was done carefully, considering criteria such as optimal performance, versatility, reliability, low cost, availability and ease of acquisition (according to the market).

The student accesses the test bench through a web platform that allows authentication through a username and password. Passing a short knowledge test enables access to one of the three available practice modules: phase control, speed control of a DC motor using the PWM technique and a DC-DC buck converter. The platform communicates through an IoT service with a local server implemented in a low-cost microcomputer using a freely distributed operating system; this in turn is connected to a master card that communicates with the modules of each practice, sending the corresponding data for the adjustment of the parameters inherent to the practice, as well as the real-time display of the associated variables.

The design of this test bench is characterized by its open and scalable architecture, which means that it is prepared to integrate new modules and technologies as courses and educational needs evolve. This flexibility allows the system to be adapted for remote practice in laboratories of various electronics-related courses.

Keywords: Remote practices, IoT, Power electronics, Buck type DC-DC converter, Phase control, Chopper, Open source code.

Objetivos

Objetivo general

Implementar un banco de pruebas de un sistema de control remoto de bajo costo para la realización de prácticas de electrónica de potencia utilizando una plataforma web en código abierto que controla los módulos de práctica y la adquisición de datos.

Objetivos específicos

- Desarrollar una aplicación web que permita el acceso del estudiante para la realización de las prácticas de acuerdo a los requisitos establecidos.
- Implementar los módulos de trabajo que permitan la realización de las prácticas típicas de un curso de electrónica de potencia.
- Determinar el rendimiento del sistema, a partir de su funcionamiento técnico, su modularidad y facilidad de uso.

Introducción

La forma tradicional de aprendizaje en la ingeniería requiere de una formación teórica y práctica; la formación práctica permite al estudiante afianzar los conocimientos adquiridos en las aulas de clase. Esta modalidad requiere espacios físicos dotados de equipos (laboratorios). En el caso de la electrónica de potencia, se requiere además la supervisión de un docente, por motivos de acompañamiento en el proceso educativo y por razones de seguridad, debido al riesgo que conllevan las prácticas; todo esto hace que los costos de operación de los espacios sean relativamente altos y los tiempos de uso sean bastante limitados.

Todo esto, sumado al aumento en la cobertura y la educación no presencial, hacen necesaria la búsqueda de alternativas para este tipo de prácticas, como la modalidad virtual, donde la infraestructura física no existe y se reemplaza por entornos netamente simulados, donde la interacción con los equipos y el fenómeno real no es más que el resultado de los modelos programados en un software [1].

Por otra parte, está la modalidad remota, en la cual se cuenta con el espacio físico, con equipos y componentes y, aunque la interacción se hace mediante interfaces tanto de hardware como de software, los fenómenos que ocurren a distancia son reales y se pueden ver y controlar, siendo esta una experiencia más cercana a la modalidad presencial [1].

Existen diversas soluciones comerciales que facilitan el trabajo remoto, entre las cuales destacan las siguientes: ELVIS [2], Analog Discovery Board [3][4] LabVolt [5] entre otras. Aunque estos sistemas permiten hacer prácticas a distancia, el control de los parámetros de los módulos, la adquisición de datos y la visualización de los mismos, suelen ser costosos y están vinculados al uso exclusivo del software y los módulos proporcionados por el fabricante.

El IoT ha revolucionado la forma en que se interactúa con los dispositivos, permitiendo un avance significativo en la capacidad de control remoto [6]. Ahora se pueden monitorear y gestionar dispositivos desde cualquier lugar del mundo a través de una conexión a internet, con la ventaja del poco consumo de datos, lo que permite una conexión eficiente y económica, incluso en entornos con limitaciones de ancho de banda.

Por todas estas razones, es esencial disponer de una alternativa versátil para realizar prácticas en modalidad remota, que permita la integración flexible de nuevos módulos según las necesidades de los cursos. Además, debe operar en entornos con acceso limitado a conexiones de internet y de sencilla implementación para los usuarios (docentes y estudiantes). Teniendo en cuenta estas necesidades, se desarrolló este trabajo de investigación, donde se implementó un banco de pruebas remotas para el curso de electrónica de potencia, haciendo uso de las tecnologías basadas en IoT con componentes de bajo costo, que permite la escalabilidad y

adaptabilidad a otros cursos, que usa código abierto y además brinda la posibilidad de utilizarse de manera local en un entorno seguro.

Capítulo 1: Estado del arte.

En el área de la electrónica en general, se han planteado diversas soluciones para resolver el problema de las prácticas remotas; específicamente, en electrónica de potencia son muy pocas, pero todas tienen enfoques que utilizan estructuras similares y contienen varios elementos comunes, como se describe a continuación:

En el trabajo de Yalcin [7] se utiliza Matlab y Visual Studio para desarrollar un software de simulación llamado VPwrLab. Este contiene 6 módulos de trabajo en los que están condensados los temas de un curso completo de electrónica de potencia. El estudiante accede a la simulación en una plataforma web alojada en un servidor. Previamente, debe haber creado un usuario y una contraseña. Una vez autorizado, escoge el módulo y varía los parámetros de los circuitos en los que está trabajando, a la vez que puede observar la respuesta de los mismos en las ventanas que ofrece el simulador.

Si bien, el trabajo no se ajusta al concepto de prácticas remotas como tal, sienta un precedente frente a los simuladores anteriores [8] [9] por lo completo del contenido con el que se realiza el trabajo.

Por otro lado, está el proyecto VISIR (*Virtual Instruments Systems in Reality*) que fue desarrollado a finales de los 90 por el Instituto Tecnológico de Blekinge (BHT) (Suecia), y está destinado a la enseñanza de circuitos eléctricos y electrónicos [10]. Este está compuesto por:

- Una interfaz, desarrollada bajo una licencia pública general de GNU, en la cual aparece una protoboard en donde se ponen los componentes para crear el circuito y los instrumentos tales como fuente, osciloscopio y generador de señales.
- Un servidor de medidas, aplicación escrita en visual C++. Está a cargo de la validación de los datos del usuario, el manejo de las peticiones de la interfaz con el mismo y de la verificación y la comprobación de los datos y los valores ingresados para el circuito.
- Un servidor de equipos, aplicación desarrollada en LabVIEW. Esta se encarga de la comunicación con el servidor de medidas y del control del hardware.

La plataforma de Instrumentación, a su vez, está compuesta por dos partes:

- Un chasis provisto por la NI (*National Instruments*) en el cual está el controlador del sistema (un PC embebido, aunque puede ser un PC externo) conectado a las tarjetas de instrumentación (fuente, multímetro, generador de señales, osciloscopio).
- Una matriz de tarjetas interconectadas entre sí, en las cuales están los componentes y los relevos, que se encargan de la interconexión de los componentes que conforman el circuito que el estudiante ha montado previamente en el protoboard usando la interfaz web.

Ansal [11] utiliza un sistema de adquisición de datos MyRio y LabVIEW siguiendo con el uso de los elementos de la NI; este trabajo consta de una página web que permite el acceso remoto a un instrumento virtual desarrollado con LabVIEW y que está instalado en un computador ubicado en el sitio del laboratorio. A este computador se le conecta el sistema MyRio, que recibe la configuración del instrumento virtual y genera las señales que son necesarias para controlar una tarjeta de diseño propio, en la que está ensamblado un convertidor DC-DC tipo BUCK (reductor de voltaje). Este genera las señales que adquiere el sistema y las lleva al instrumento virtual para medirlas y representarlas.

De la misma manera, se utilizó LabVIEW, un sistema de adquisición de datos NI6008 y tarjetas con sensores para prácticas remotas del curso Acondicionamiento de señales en el departamento de Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia; esto se dio por motivo de la pandemia generada por el COVID-19 durante el segundo semestre del año 2020 y el primer semestre del año 2021. Las tarjetas de sensores se conectan al sistema NI6008 según la práctica que se realice. El sistema de adquisición de datos se conecta a los computadores donde previamente se ha instalado, además del LabVIEW, un software de control remoto llamado Anydesk (utilizando su versión de prueba). A su vez, los estudiantes del curso deben instalarlo en sus ordenadores y, mediante a autenticación que el software de control remoto requiere, toman el control del equipo donde están conectadas las tarjetas y construyen los instrumentos virtuales que generan señales de control y adquieren los datos correspondientes a las variables a medir.

Esta actividad estuvo a cargo del profesor Orlando Carrillo Perilla, profesor titular del curso de Acondicionamiento de Señales, y Sergio Andrés Díaz Carmona, profesor del laboratorio del mismo curso.

La compañía NI tiene su propia solución y es el ELVIS (*Engineering Laboratory Virtual Instrumentation Suite*). Un sistema modular de laboratorio de ingeniería, el cual incluye un osciloscopio, multímetro digital, generador de funciones, fuente de alimentación variable, y otros instrumentos comunes. Se puede conectar el sistema a un computador por medio del puerto USB y permite realizar proyectos en un protoboard desmontable [12].

Entre los módulos de prácticas se encuentra un módulo para el trabajo en electrónica de potencia, mecatrónica, comunicaciones. entre otros; además, tiene también una plataforma web para la realización de las prácticas de manera remota.

La compañía FESTO *Didactic* ofrece dos sistemas: LabVolt [13] y FACET [14] (*Flexible Automated Circuit Engineering Technology*), las cuales son plataformas educativas que ofrecen una amplia gama de recursos para la formación técnica y

profesional, teniendo entre ellos módulos de trabajo en diversas áreas de la electrónica y la automatización.

Ambos son sistemas de trabajo modulares que, dependiendo de la configuración, permiten el montaje de los circuitos en los módulos y la adquisición de datos por medio del sistema o haciéndolo con equipos externos al sistema. Posee además una interfaz (que debe utilizarse en un computador) que permite al usuario el control de los módulos, la visualización de los parámetros y la simulación de los circuitos que poseen los módulos de trabajo. Puede ser también utilizado de forma remota haciendo uso de configuraciones adicionales.

La compañía Digilent ofrece un producto, Analog Discovery Board [3], para uso en educación, investigación y desarrollo en el campo de la electrónica. funciones, incluyendo adquirir datos, generar señales, visualizar formas de onda y emular circuitos. Se conecta mediante el puerto USB a un computador y utiliza como interfaz el software WaveForms [15] para su interacción con el usuario; además, permite su operación remota con algunas configuraciones adicionales.

Otro enfoque aparece con el trabajo de Rivera [16], el cual se centra en el aprendizaje personalizado. Se implementa un laboratorio remoto en ambientes virtuales de aprendizaje llamado SARL (*Smart Adaptive Remote Laboratory*). Este consiste en una plataforma desarrollada con Python, JavaScript y HTML 5, donde el estudiante crea un perfil y comienza su trabajo. A medida que avanza el curso, el software toma cuenta del progreso del estudiante y adapta las prácticas de laboratorio a un nivel adecuado para él. La etapa de hardware se implementó mediante una Raspberry Pi a la que fueron conectados sensores, actuadores y una cámara web para la visualización de lo que sucede en el espacio del laboratorio.

Aparecen también otros trabajos como el de Benattia [1] en el cual se utilizan elementos de bajo costo para reemplazar los equipos. En este caso, se utiliza una placa Pc-Duino o una Raspberry Pi en lugar de un computador para implementar el servidor de laboratorio, que se conecta a una tarjeta controladora de diseño propio y permite la modificación de los parámetros en un circuito. En este trabajo hay una evolución marcada por el paso de relevos mecánicos a suiches MOS, aumentando la velocidad, reduciendo el consumo y el tamaño de la tarjeta misma. El circuito analizado se conecta a esta tarjeta para recibir las señales de control y a los elementos de medición en una red LAN; todo esto se puede desde una plataforma web en un servidor y desde la cual el estudiante realiza su práctica remota.

Fernández-Pacheco [17] en su trabajo implementa una solución sencilla y que deja abierta la posibilidad para el IoT. Utiliza una Raspberry Pi como servidor de aplicaciones conectada a la red y accesible desde computadores y dispositivos móviles. Esta Raspberry Pi a su vez está conectada a un Arduino a través del puerto USB para comunicarse y controlarlo; el Arduino es conectado a los sensores y actuadores necesarios para las prácticas remotas. Todo el proceso se visualiza mediante una cámara web conectada a la Raspberry Pi. El número de procesos

simultáneos depende del número de puertos libres en la Raspberry Pi para la conexión, más conjuntos Arduino-sensor-actuador.

El proyecto LaboREM es un laboratorio remoto desarrollado para el aprendizaje de la electrónica, en el cual los estudiantes ensamblan sus circuitos por medio de un brazo robótico controlado remotamente [15]. Letowski [16] describe la arquitectura básica del LaboREM: una interfaz web comunicada con un servidor local por medio de la red; este servidor a su vez está conectado a una tarjeta madre que tiene ranuras de expansión en las cuales un brazo robótico (también conectado al servidor local) inserta los módulos de práctica para que el estudiante trabaje y hay dos cámaras web conectadas para monitorear el proceso, además los equipos de generación y visualización de las señales están conectados tanto a la tarjeta madre como al servidor local. En este trabajo se destaca la evolución del sistema que inicialmente utiliza el LabVIEW para sus interfaces y sistemas de adquisición y un computador de altas capacidades como servidor local a una solución de bajo costo que utiliza tarjetas fabricadas por ellos mismos, software de código abierto y una Raspberry Pi para implementar el servidor local.

El trabajo de Amaudov [17] utiliza un laboratorio existente donde solo está presente el docente (esto a partir de la pandemia generada por el covid-19) y permite a los estudiantes realizar remotamente las prácticas. Utiliza una plataforma web en la que los estudiantes pueden controlar una fuente DC (controlada de manera remota). Esta fuente varía el voltaje de entrada a un convertidor DC tipo *boost* (Elevador), la salida es conectada a un dispositivo de medida con conexión bluetooth y se transmite a un computador, en el cual se instala una aplicación de reuniones en línea y los estudiantes pueden visualizar los resultados en la pantalla. También se conecta una cámara web a este computador para que los estudiantes visualicen lo que pasa en el laboratorio.

Limpraptono [18] en su desarrollo utiliza aplicaciones en dispositivos móviles para el acceso remoto de los estudiantes, estas aplicaciones se comunican con un servidor web (embebido en una Raspberry Pi 4, en la cual también hay una base de datos hecha en MySQL). La Raspberry Pi se comunica con una tarjeta selectora de los módulos de prácticas, donde se selecciona el que se va a utilizar y además se comunica con un sistema RED PITAYA [19].
Este sistema se encarga de generar las señales de excitación y de capturar las respuestas de los circuitos que están en los módulos de práctica, así el estudiante puede visualizar en tiempo real su práctica de laboratorio.

Przybyla [20] desarrolla un sistema para prácticas remotas en electrónica de potencia; los estudiantes y el docente se conectan a una plataforma remota (Zoom, Google Meet, entre otros), donde inician su sesión y se permite el control del sistema bajo la guía del instructor. El sistema utiliza una Raspberry Pi 4 como servidor local para gestionar las comunicaciones entre la aplicación remota (*Ethernet*) y el sistema de adquisición de datos (en este caso una Analog Discovery Board conectada mediante USB), además de comunicarse también con una tarjeta de control basada

en microcontroladores (vía UART). La tarjeta antes mencionada envía las señales de control a una tarjeta donde están montados los circuitos de trabajo. Esta tarjeta es reconfigurable y permite cambiar de topologías mediante las señales enviadas por la tarjeta de control. La visualización de las señales de entrada y salida de los circuitos se hace mediante el software WaveForms [21].

Rythea [22] implementa un laboratorio para la realización de prácticas remotas en electrónica digital: los estudiantes acceden a una plataforma web desarrollada en React, desde donde se pueden cargar los programas para los dispositivos de hardware (en este caso FPGA [23]); obtener retroalimentación de los resultados y visualización en tiempo real del proceso por medio de cámaras web. La plataforma se conecta a un servidor implementado en un computador que utiliza como sistema operativo una distribución de Linux, en este equipo se conectan las tarjetas y está instalado el software de programación para las tarjetas (Xilinx).

A continuación, se presenta una síntesis de los hallazgos clave derivados del análisis del estado del arte en la siguiente tabla:

Tabla 1. Análisis de trabajos en prácticas remotas en enseñanza de electrónica.

Proyecto	Año	Software	Ventajas	Desventajas
A Web-Based Wirtual Power Electronics Laboratory	2016	Matlab Visual Studio	Posee un conjunto Amplio de las prácticas correspondientes a un curso de electrónica de potencia	Es un entorno netamente simulado, no hay ningún tipo de dispositivo físico, usa software de costo elevado.
Empirical Analysis of the Use of the VISIR Remote Lab in Teaching Analog Electronics	2016	LabVIEW Phyton Javascript C/C++ SQL	Permite acceso remoto a los equipos reales de laboratorio, y tiene una buena cantidad de módulos de prácticas, y visualización de medidas en tiempo real	Utiliza elementos de la National Instruments, los cuales suelen ser costosos, requiere una conexión a internet muy estable. Es poco flexible a la hora de reconfigurar los experimentos.
Remote Laboratories Integration into Electronics Engineer Curricula	2018	LabVIEW Phyton Javascript C/C++ SQL	Brinda acceso remoto a los equipos reales de laboratorio, tiene una buena cantidad de módulos de prácticas, y permite la visualización de medidas en tiempo real	Utiliza elementos de la National Instruments, los cuales suelen ser costosos, requiere una conexión a internet muy estable es poco flexible a la hora de reconfigurar los experimentos.
Remote triggered lab for Buck converter using lab view	2019	LabVIEW	Permite medición en tiempo real de las variables y el acceso remoto mediante una página web	Utiliza Elementos de la National Instruments que suelen ser costosos, necesita una conexión de internet estable y un computador con el software instalado; sólo posee un módulo de prácticas

Prácticas remotas Acondicionamiento de Señales Universidad de Antioquia	2020 2021	LabVIEW Anydesk	Permite el acceso remoto al hardware y medición de las variables en tiempo real.	Utiliza Elementos de la National Instruments que suelen ser costosos; necesita una conexión de internet estable y un computador con el software instalado; las variables a medir no pueden ser modificadas de manera remota.
NI ELVIS	2007-Presente	LabVIEW	Tiene diversos módulos de práctica, instrumentos de medición y generación de señales embebidos en el sistema; permite acceso remoto y mediciones en tiempo real.	Es un sistema comercial costoso, y dependiente de los elementos propios del fabricante, necesita un computador conectado con el software una a conexión de internet muy estable
FACET	2016-Presente	FACET VI	Tiene diversos módulos de práctica, Interfaz amigable con el usuario y permite mediciones en tiempo real	Sistema comercial costoso, y dependiente de los elementos propios del fabricante, necesita un computador conectado con el software una a conexión de internet muy estable; tiene poca flexibilidad para personalizar las prácticas.
Analog Discovery Board	2012-Presente	WaveForms LabVIEW	Posee adaptabilidad a múltiples módulos de prácticas; incluye generadores de señales y elementos de medida	Es básicamente un sistema de Adquisición de datos con conexión USB; es costoso y utiliza su propio entorno.
Implementation of cloud-based smart adaptive Remote Laboratories for education	2017	Python Java HTML5	Utiliza software de código abierto y elementos de hardware de bajo costo; puede ser usado desde dispositivos móviles. Ofrece visualización del experimento vía webcam	Experimentación muy básica usando montajes sencillos en protoboard.
Design of a low cost switching board enabling a reconfigurable remote experiment	2019	HTML PHP JavaScript	Utiliza software de código abierto y hardware de bajo costo, posee una interfaz de fácil uso que permite la reconfiguración de las prácticas en una sola tarjeta	Requiere instrumentos de medición con conexión a la red.
Implementation of an arduino remote laboratory with raspberry pi	2019	Linux	Utiliza software de código abierto y hardware de bajo costo orientado al IoT. Posee una plataforma adaptativa a la curva de aprendizaje del estudiante; además utiliza una cámara web para la visualización de los montajes	Los elementos a medir y a controlar son muy reducidos, ya que dependen de un sistema de desarrollo muy sencillo (Arduino) y las practicas son muy básicas.

A fully open source remote laboratory for practical learning	2020	Python PyScada HTTP HTML5	Utiliza una plataforma orientada a IoT basada en software código abierto; usa una Raspberry Pi como servidor local y posee una tarjeta modular con la posibilidad de realizar 16 prácticas	Utiliza instrumentos de medición costosos, además de un brazo robótico para la inserción de las tarjetas en las ranuras de la tarjeta modular y dos cámaras para la visualización del proceso.
Distance learning and remote laboratory exercises on power supply systems	2020	Lte Pspice Java Flash	Ofrece la posibilidad de simulación de los circuitos, permite la variación remota de los parámetros del equipo, permite la modificación rápida de las guías de laboratorio.	Utiliza software cuyas licencias son costosas, solo se puede hacer un tipo de práctica, no es modular ni escalable. Además, utiliza plataformas comerciales para las sesiones de práctica.
The Development of Electronics Telecommunication Remote Laboratory Architecture Based on Mobile Devices	2021	HTML 5 Java Linux MySQL Apache	Posee una interfaz web basada en software de código abierto; utiliza una Raspberry Pi como servidor Web, además de un sistema Red Pitaya como instrumento para la medición y generación de señales; puede ser usada desde dispositivos móviles y dispone de opción para reserva del espacio.	Necesita una conexión estable a internet; el sistema de adquisición de datos y generación de señales es costoso, los módulos de práctica son muy básicos.
Educational Platform for Remote Power Electronics Laboratory Classes	2022	Phyton Zoom WaveForms	Tarjetas de control y de prácticas de fabricación propia, reconfigurables y de bajo costo y con la posibilidad de realizar varias prácticas, interfaz propia en código abierto.	Utiliza un sistema de adquisición medianamente costoso; necesita de un pc conectado al sistema y una conexión a internet estable. Utiliza plataformas comerciales.
Remote field-programmable gate array laboratory for signal acquisition and design verification	2023	Linux NodeJS Xilinx ReactJs Phyton	Posee una interfaz web basada en software de código abierto, al igual que las aplicaciones; utiliza cámaras para visualización en tiempo real	Utiliza un computador como servidor que requiere una conexión a internet estable con un ancho de banda considerable; las tarjetas programables y el software son costosos, utiliza una cámara por cada FPGA.

Del análisis realizado en la Tabla 1, se observan dos tendencias generales. Una tendencia orientada hacia la adopción de sistemas comerciales costosos que suelen carecer de flexibilidad para adaptarse a las necesidades emergentes, así como de una integración efectiva con tecnologías de vanguardia como el IoT. La segunda tendencia se orienta hacia el uso de desarrollos propios y se usan herramientas de código libre, pero los módulos de práctica son limitados y en algunos solo hay un módulo disponible, además los sistemas no migran fácilmente a otras áreas, muy pocos permiten el trabajo remoto y local. En los trabajos revisados, no se reporta la implementación de una evaluación de los conceptos previos a la práctica remota, para verificar los conocimientos adquiridos de manera teórica y que permita retroalimentar las habilidades, los progresos y falencias del estudiante, para asegurar un aprendizaje adecuado bajo esta modalidad.

En este trabajo se implementó una solución integral que aborda estas deficiencias y promueve un aprendizaje más efectivo y relevante en el campo de la electrónica de potencia, utilizando las ventajas que ofrece el IoT, las herramientas de código abierto, que permite el trabajo de forma tanto remota como local, posee una tarjeta de control que admite varios módulos de práctica y puede ser migrado fácilmente a otros cursos en el área de la electrónica; cuenta con una interfaz web sencilla e intuitiva y además todo esto se hizo con elementos de bajo costo.

Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Internet de las cosas IoT

El Internet de las cosas (IoT) es un concepto tecnológico que abarca la interconexión digital de objetos cotidianos mediante dispositivos y sistemas embebidos, sensores y actuadores, que están integrados en la infraestructura de la red. Estos dispositivos recopilan y comparten datos en tiempo real a través de redes inalámbricas o cableadas, lo que permite una comunicación fluida entre los objetos físicos y el entorno digital. Esta interconexión posibilita la captura, análisis y procesamiento de grandes volúmenes de datos, lo que facilita la automatización de tareas, la toma de decisiones inteligentes y la optimización de procesos en diversos ámbitos, como la industria, la salud, el transporte, la agricultura, entre otros [24] Además, el IoT tiene el potencial de optimizar procesos, aumentar la eficiencia operativa y ofrecer servicios innovadores y adaptados a las necesidades específicas de los usuarios, aprovechando el análisis de datos y la integración de soluciones tecnológicas avanzadas. La figura 1 muestra el esquema general de un sistema IoT.

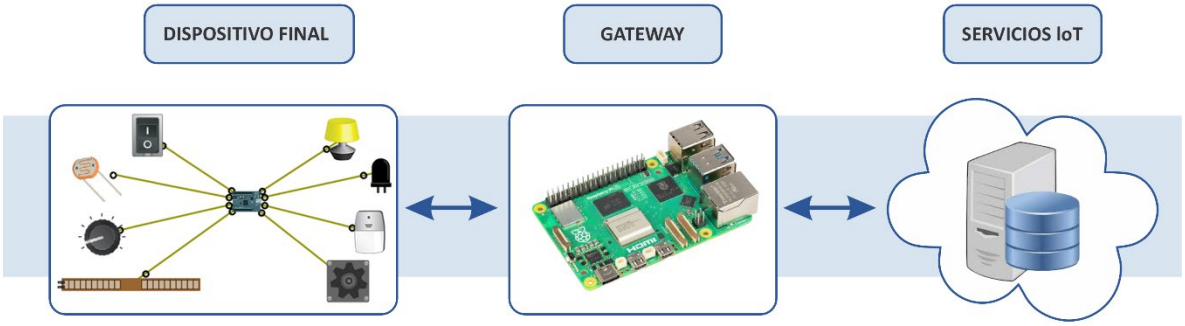


Figura 1. Esquema general de un sistema IoT

2.1.1 Dispositivo final:

Son los dispositivos periféricos que recopilan datos del entorno físico o ejecutan acciones específicas [25], estos dispositivos suelen estar equipados con sensores para recopilar información y actuar como puntos finales de la red IoT. Entre ellos están:

Sensores: Son dispositivos que convierten una variable física, química, biológica o química en una magnitud eléctrica, permitiendo el acondicionamiento,

procesamiento, almacenamiento y transmisión de su información y poder ejercer posteriormente acciones de control.
Actuadores: Son dispositivos que ejecutan una acción cuando reciben un estímulo, es decir, transforman un tipo de energía en otra dentro de un proceso.
Microcontroladores: Son dispositivos programables que reciben las señales de los sensores y de acuerdo con el programa interno generan señales para controlar los actuadores.

2.1.2 Conectividad:

Son las diferentes tecnologías que permiten la comunicación entre los dispositivos IoT y la infraestructura de red, dentro de las cuales podemos destacar Wi-Fi, Bluetooth, Xbee, LoRa, Z-Wan, Ethernet entre otras [26].
Estas tecnologías utilizan protocolos de comunicación, para la transferencia de información.

2.1.3 Protocolos de comunicación:

Los protocolos de comunicación son conjuntos de reglas y convenciones que especifican cómo se intercambian datos entre dispositivos en un sistema de comunicación [27]. Estos protocolos establecen la estructura y el formato de los mensajes, así como los procedimientos para la transmisión, recepción y procesamiento de datos. Además, definen aspectos como la sincronización, la detección y corrección de errores, la gestión del flujo de datos y la identificación de dispositivos en la red. Los más comunes son:

Serial: Protocolo de comunicación en el que los bits de información se envían secuencialmente, uno tras otro, a través de un canal, que puede ser un medio confinado (cables, fibra óptica) o radiado (inalámbrico). Este protocolo especifica aspectos como el formato de los datos (bits de inicio, bits de datos, bits de paridad, bits de parada), la velocidad de transmisión (baudios o bits por segundo), el tipo de conexión (*half-duplex, full-duplex*), y el método de sincronización (síncrono o asíncrono). Además, puede incluir reglas para la detección y corrección de errores, la administración del flujo de datos y la identificación de dispositivos en la red. Entre estos se destacan:

- RS-232
- RS-485
- UART
- SPI
- I2C

Paralelo: Protocolo de comunicación en el cual los bits de información se envían a la vez mediante líneas de datos paralelas.
Este protocolo implica enviar datos en grupos de bits, donde cada bit del grupo se transmite a través de un cable separado. La velocidad de transmisión y la cantidad de datos transmitidos por ciclo de reloj pueden ser más altas que la comunicación serial. Sin embargo, la comunicación paralela puede ser más susceptible a problemas de sincronización y ruido en comparación con la comunicación serial.
Entre estos se destacan:

- PATA (*Parallel ATA*)
- SCSI
- IEEE 1284

2.1.4 *Gateway*:

Los dispositivos *gateway* en un sistema IoT son puntos de conexión que actúan como intermediarios entre los dispositivos finales (*end devices*) y la infraestructura de red más amplia. Estos dispositivos son responsables de facilitar la comunicación entre los dispositivos IoT y la nube [28]. Además de la conectividad, pueden proporcionar funciones adicionales como el procesamiento de datos local, el enrutamiento de mensajes, la seguridad de la red y la gestión de dispositivos. Sirven como punto de entrada y salida para los datos que fluyen entre los dispositivos IoT y los sistemas de gestión o análisis.

Para este propósito pueden utilizarse dispositivos tales como:

Routers: Son dispositivos de red diseñados específicamente para proporcionar conectividad a los dispositivos que lo requieran. Estos r*outers* suelen estar equipados con capacidades avanzadas de comunicación, como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee o tecnologías celulares, y están optimizados para gestionar grandes volúmenes de datos. En el caso del IoT, suelen ofrecer funciones de seguridad integradas y capacidades de gestión remota para garantizar un funcionamiento seguro y fiable de los dispositivos conectados en dichos entornos [29].
PLC: Controladores Lógicos Programables diseñados para monitorear y controlar procesos en entornos industriales, poseen interfaces de comunicación (generalmente *ethernet*), razón por la cual pueden funcionar como *gateways* IoT al conectarse con sensores y actuadores en el campo y enviar los datos a la nube para su procesamiento y análisis.
Computadores de placa única (SBC): (*Single Board Computers*), también conocidos como microcomputadores, son dispositivos completos que integran todos los componentes básicos de un sistema informático en una única placa de circuito impreso [30]. Esto incluye procesador, memoria RAM, almacenamiento, puertos de entrada/salida y. en la mayoría de los casos, interfaces de red y otros componentes

adicionales. Estos dispositivos son compactos y de bajo costo, pueden ejecutar sistemas operativos completos, como Linux o Windows, lo que los hace versátiles y adecuados para los sistemas IoT.

Entre ellos se destacan:

- Raspberry Pi
- Beaglebone
- Dragonboard
- PC Duino
- Arduino

2.1.5 Protocolos de comunicación IoT

Son protocolos de comunicación que tienen ciertas características orientadas al internet de las cosas, como por ejemplo la optimización de la energía, consumo reducido de ancho de banda, escalabilidad, interoperabilidad, seguridad, entre otros [31].

Los más comunes son:

HTTP: El protocolo de comunicación de transferencia de hipertexto (HTTP, por sus siglas en inglés) es utilizado para la transferencia de información en la *World Wide Web*. Funciona bajo el modelo solicitud-respuesta, más conocido como cliente-servidor.
HTTP opera sobre el Protocolo de Control de Transmisión (TCP, por sus siglas en inglés) y se utiliza para transmitir documentos de texto, imágenes, videos y otros recursos web. Utiliza el puerto TCP 80 de forma predeterminada para la comunicación, aunque también puede usar otros puertos como el 8080. El intercambio de información en HTTP se realiza mediante mensajes de solicitud y respuesta entre un cliente y un servidor web. Una solicitud HTTP consiste en un encabezado de solicitud que incluye el método de solicitud (como GET, POST, PUT, DELETE), la URL del recurso solicitado y otros metadatos, mientras que una respuesta HTTP contiene un encabezado de respuesta y el cuerpo del mensaje, que puede incluir el recurso solicitado o un mensaje de error [32].

MQTT: El Protocolo de Telemetría de Mensajes por Cola (MQTT, por sus siglas en inglés) es un protocolo de mensajería ligero diseñado para sistemas IoT. Funciona bajo el modelo cliente-servidor y utiliza un intermediario (*Broker*) para facilitar la comunicación entre los clientes que pueden ser tanto dispositivos como aplicaciones que desean intercambiar mensajes entre sí [33]
MQTT opera sobre TCP/IP y utiliza un enfoque de publicación/suscripción. En este modelo, los dispositivos publican mensajes en "tópicos" específicos y otros dispositivos se suscriben a estos tópicos para recibir los mensajes relevantes.

Entre las características principales de MQTT podemos destacar:

1. Eficiencia en términos de uso de recursos de energía y ancho de banda, siendo ideal para la comunicación entre sensores en las redes IoT.
2. Es altamente escalable y puede manejar una gran cantidad de dispositivos y conexiones simultáneas, lo que lo hace adecuado para despliegues a gran escala en entornos IoT.
3. Modelo de publicación/suscripción.
4. Puede implementar medidas de seguridad, como autenticación y cifrado de extremo a extremo, para proteger la integridad y la confidencialidad de los datos transmitidos.
5. Ofrece tres niveles de Calidad de Servicio (QoS) que permiten configurar el nivel de garantía de entrega de mensajes según los requisitos de la aplicación.

CoAP: El Protocolo *Constrained Application Protocol* (CoAP) es un protocolo de comunicación diseñado para dispositivos con recursos limitados, como sensores y dispositivos IoT. CoAP opera sobre el protocolo UDP (User Datagram Protocol) y está optimizado para ser eficiente en términos de ancho de banda y consumo de energía [34]. Permite la transferencia de datos en un formato simple y compacto, utilizando un modelo de solicitud/respuesta similar a HTTP. CoAP también ofrece soporte para características como descubrimiento de recursos, notificaciones y *multicast,* lo que lo hace adecuado para aplicaciones de IoT que requieren comunicación eficiente y escalable entre dispositivos en redes de baja potencia y baja velocidad.

LoRaWAN: Es un protocolo de red de capa MAC para redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), diseñado para gestionar la comunicación entre dispositivos de bajo consumo a través de la modulación LoRa. Opera en una topología de estrella, donde los nodos envían datos a *gateways*, que a su vez retransmiten a servidores centrales. LoRaWAN define la estructura de los paquetes de datos, mecanismos de acceso al canal, control de enlace, seguridad mediante autenticación y cifrado, y soporte para comunicación bidireccional, optimizando la escalabilidad y la eficiencia energética en redes IoT[35].

2.1.6 Servicios IoT

Los servicios IoT son aplicaciones o funcionalidades que se ofrecen a través de dispositivos conectados a Internet. Estos permiten la recopilación, procesamiento y

análisis de datos generados por los dispositivos IoT, así como la ejecución de acciones automatizadas basadas en estos datos. También pueden incluir funciones como monitoreo remoto, control de dispositivos, análisis predictivo, mantenimiento preventivo, optimización de procesos y servicios personalizados basados en la información recopilada de los dispositivos conectados [6].

Entre estos se encuentran:

Infraestructura de red: Está conformada por los servidores, *gateway*, enrutadores y otros componentes necesarios para facilitar la comunicación entre los dispositivos IoT y las aplicaciones de usuario, entre estos se encuentra el *broker*, el cual actúa como un intermediario que gestiona la distribución de mensajes entre los editores y suscriptores.
Plataformas de gestión de datos: Son sistemas diseñados específicamente para gestionar datos generados por dispositivos conectados a Internet de las Cosas. Estas plataformas ofrecen herramientas y servicios especializados para la adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos IoT, con el objetivo de extraer información valiosa y tomar decisiones informadas.
Almacenamiento en la nube: Se refiere a la práctica de almacenar y procesar datos generados por dispositivos conectados a Internet de las Cosas en servidores remotos accesibles a través de la red. Estos datos pueden incluir información recopilada por sensores, registros de eventos, datos de telemetría y otros tipos de información generada por dispositivos IoT.
Aplicaciones: Son aquellas que ofrecen a los usuarios la posibilidad de interactuar con los dispositivos IoT conectados, esta interacción puede ser con diversos fines: configuración, acceso a la información y recepción de notificaciones por parte de los mismos. Estas aplicaciones pueden adoptar diversas formas, como móviles, plataformas web o software especializado.
Analítica de datos: Es el proceso que consiste en examinar, interpretar y obtener información valiosa a partir de los datos recopilados por dispositivos conectados en un entorno IoT. Este análisis permite identificar patrones, tendencias y relaciones significativas que pueden ser utilizadas para tomar decisiones informadas, mejorar la eficiencia operativa y ofrecer mejores servicios a los usuarios finales.
Seguridad: Se conoce como el conjunto de medidas y prácticas implementadas para proteger los dispositivos conectados, los datos transmitidos y almacenados, así como las redes y sistemas que los respaldan, contra posibles amenazas y vulnerabilidades. Esto incluye la autenticación de dispositivos, el cifrado de datos, la gestión de accesos, la detección de intrusiones y otras técnicas para garantizar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los sistemas IoT.

2.1.7 Node Red

Es una herramienta de programación visual de código abierto basada en **Node.js** que se utiliza para crear aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) al permitir la

interconexión de dispositivos, APIs [36], servicios en línea y flujos de trabajo de automatización sin la necesidad de escribir código, utilizando para esto nodos preprogramados que se pueden arrastrar y soltar para representar diferentes funciones [37].

Dentro de sus ventajas se encuentran:

- **Flujo de datos:** Se basa en un modelo de flujo de datos, donde los datos fluyen entre los nodos. Esto facilita la creación de aplicaciones reactivas y escalables.
- **Escalabilidad:** Es altamente extensible, con una gran comunidad que desarrolla nodos y módulos personalizados para ampliar sus funcionalidades.
- **Código abierto:** de código abierto y gratuito, lo que lo convierte en una opción viable para usuarios individuales, empresas y organizaciones educativas.

2.2 Electrónica de potencia

La electrónica de potencia puede definirse como el conjunto de herramientas y técnicas que se utilizan para el control y la conversión eficiente de la energía eléctrica entre distintos niveles y formas de onda. Esto se logra haciendo uso de dispositivos semiconductores, tales como: Diodos, Tiristores, MOSFETs, IGBTs, entre otros; a su vez controlados por dispositivos programables tales como: microcontroladores, microprocesadores y PLCs [38].

2.2.1 Circuitos fundamentales en electrónica de potencia

Son aquellas configuraciones circuitales o “topologías” que se utilizan para la conversión, acondicionamiento y control eficiente de la potencia eléctrica de una forma a otra, teniendo en cuenta las características de los componentes circuitales, para que puedan cumplir adecuadamente su función. Estos circuitos operan sobre dos tipos básicos de corriente:

- AC (Corriente Alterna)
- DC (Corriente Directa)

2.2.1.1 Convertidores AC-DC

Los rectificadores, convierten las formas de onda de corriente alterna (AC) en corriente directa (DC) usando dispositivos semiconductores tales como diodos y SCR [7]. Se utilizan tanto en sistemas monofásicos como trifásicos.

Entre los más comunes se encuentran:

Rectificador de media onda: En esta topología se emplea un solo diodo por fase, permitiendo el paso de los semiciclos positivo de la señal senoidal de entrada, y eliminando los negativos para obtener una señal DC.
Rectificador de onda completa: En esta topología se utilizan 2 diodos por fase, conectados en configuración de puente, para permitir el paso de ambos semiciclos de la señal senoidal de entrada haciendo circular la corriente por dos diodos en cada semiciclo y obtener una señal DC de mejor calidad que el rectificador de media onda.
Rectificador de onda completa semicontrolado: En esta topología se utilizan un diodo y un SCR por cada fase, con el fin de controlar el tiempo de conducción por fase y con el fin de regular el voltaje a la salida y controlar la potencia que se entrega a la carga.
Rectificador de onda completa totalmente controlado: En esta topología se utilizan dos SCR por cada fase, al igual que en el rectificador semicontrolado se puede regular el voltaje a la salida y controlar la potencia entregada a la carga, sólo que se hace de forma más precisa ya que se tiene control sobre la totalidad de los elementos rectificadores, hay mayor eficiencia energética y menor distorsión por armónicos.

2.2.1.2 Convertidores AC-AC

Son circuitos electrónicos que pueden convertir una forma de onda AC de entrada en otra forma de onda AC, pero variando sus parámetros, tales como frecuencia, fase y amplitud [39], se pueden emplear tanto en sistemas monofásicos como trifásicos.

Entre los más comunes se encuentran:

Convertidor de frecuencia variable: Este tipo de convertidor toma una señal de entrada AC de voltaje y frecuencia fija, la rectifica y la filtra para convertirla en una señal AC de frecuencia y voltaje variables, generalmente para controlar motores asíncronos, en los cuales la velocidad de rotación del motor depende de la frecuencia de la señal de alimentación.
Ciclo convertidor: Este tipo de convertidor toma una señal de entrada AC de voltaje y frecuencia fija, la rectifica y la filtra para convertirla en una señal AC de voltaje fijo y frecuencia variable, comparado con el convertidor de frecuencia variable, suele ser más eficiente y robusto, además permite un control más preciso

de la frecuencia de salida. Se utilizan principalmente para conectar turbinas eólicas a la red eléctrica.
Convertidor de matriz: Este tipo de convertidor utiliza un arreglo matricial de suiches bidireccionales para la conversión de la señal de entrada AC de voltaje y frecuencia fija en una señal de salida AC, variable en voltaje y frecuencia. La diferencia principal con los otros convertidores es que no utiliza una etapa intermedia de conversión AC-DC, lo que los hace más compactos, robustos y eficientes.

2.2.1.3 Convertidores DC-DC

Son circuitos electrónicos que pueden transformar una señal DC en otra señal DC, pero con una amplitud o polaridad distinta [40]. Para esto se utilizan capacitores, inductores, diodos y transistores, interconectados en topologías que varían dependiendo de si la amplitud de salida deseada es mayor o menor a la de entrada.

Entre los más comunes se encuentran:

Chopper: También conocido como convertidor de conmutación, es un circuito que se utiliza para controlar la cantidad de energía entregada a una carga desde una fuente de alimentación DC: Esto se logra generando una señal PWM (*Pulse Width Modulation*) para conmutar un transistor y lograr un voltaje estable en la carga, proporcional al ciclo de trabajo de la señal generada. Se usa para el control de velocidad en motores DC.
Buck*:* También conocido como convertidor reductor, es un circuito diseñado para disminuir un voltaje de entrada de corriente continua (DC). Opera a través de un transistor que conmuta de manera controlada a una frecuencia específica. Durante la fase de conducción del transistor, la energía se acumula en un inductor. Cuando el transistor se desactiva, esta energía se transfiere a la carga, manteniendo un voltaje de salida estable. Este proceso de conmutación se repite de forma continua para proporcionar la salida deseada. Se utilizan en fuentes conmutadas.
Boost: También conocido como convertidor elevador, es un circuito diseñado para aumentar un voltaje de entrada de corriente continua (DC). Emplea un transistor, un inductor, un diodo y un capacitor en un circuito de conmutación controlado. Durante la fase de conducción del transistor, el inductor acumula energía de la fuente de entrada. Al desactivar el transistor, la energía almacenada en el inductor se transfiere a través del diodo hacia el capacitor y la carga conectada, obteniendo así un voltaje mayor que el de la entrada. Se utiliza en sistemas de carga de baterías.

2.2.1.4 Convertidores DC-AC

Son circuitos electrónicos que convierten la corriente DC (usualmente proveniente de baterías) en formas de onda AC a voltajes y frecuencias específicos [41]. Pueden emplearse para generar corriente AC tanto monofásica como trifásica.

Entre los más comunes se encuentran:

Inversor de onda modificada: Inversor de onda cuadrada modificada, es un tipo de inversor que genera una forma de onda senoidal, utilizando niveles de voltaje escalonados positivos y negativos, con la desventaja de que genera mucha distorsión por armónicos [42]. Se utiliza principalmente en sistemas de iluminación solar y aplicaciones domésticas básicas.
Inversor SPWM: Este tipo de inversor utiliza la técnica SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*), esta consiste en comparar una señal senoidal de referencia con una señal triangular de onda portadora de mayor frecuencia. La intersección de estas dos señales determina los puntos de conmutación para los elementos de potencia del inversor, logrando así una señal muy similar a una onda senoidal pura con baja distorsión por armónicos [43]. Es muy utilizado en variadores de velocidad para motores asíncronos, sistemas de energías renovables y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS por sus siglas en inglés).
Inversor SVWM: Este tipo de inversor es una versión mejorada de los de onda modificada, el método SVWM es una técnica avanzada de modulación PWM, en este método, el voltaje de salida se controla variando la magnitud y la duración de los pulsos de voltaje, generando así un espacio vectorial que representa el voltaje de salida, esto permite una optimización de la energía y una reducción sustancial de los armónicos [44].

2.2.2 Elementos semiconductores de potencia

Son dispositivos electrónicos que se utilizan para controlar y gestionar el flujo de corriente eléctrica en aplicaciones de alta potencia [45]. A diferencia de los semiconductores convencionales, los semiconductores de potencia están diseñados para manejar corrientes y voltajes elevados, además su capacidad de conmutación rápida ofrece ventajas para controlar el flujo de energía en aplicaciones industriales y de consumo, tales como:

- **Conversión de potencia.**
- **Control de motores.**
- **Protección de circuitos.**
- **Iluminación**

2.2.2.1 Tiristores

Son un tipo de interruptor electrónico de potencia de tres terminales, con el cual se puede controlar el flujo de corriente entre dos de sus terminales de manera unidireccional o bidireccional, por medio de un pulso de disparo que se encarga poner el tiristor en modo de conducción cuando se requiere. Los más utilizados son:

SCR: Rectificador Controlado de Silicio (por sus siglas en inglés) es un dispositivo semiconductor que consta de tres terminales (A (ánodo), K (cátodo), G (Compuerta)) que conduce la corriente de forma unidireccional desde el ánodo hacia el cátodo cuando se activa con un pulso de disparo de corta duración, este pulso se hace entre las terminales cátodo y gate. Su desactivación sucede cuando la corriente disminuye por debajo de un nivel crítico o se hace de manera forzada desviando la corriente directamente desde el ánodo hacia el cátodo. Se utilizan comúnmente en sistemas de conversión AC-DC y protección de sobretensiones. La figura 2 muestra el símbolo de un SCR.

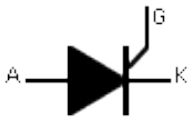


Figura 2. Símbolo SCR [46].

TRIAC: Tríodo para Corriente Alterna (por sus siglas en inglés) es un dispositivo semiconductor de tres terminales (MT1 (*main terminal 1*), MT2 (*main terminal 2*), G (Compuerta)) que puede conducir la corriente de forma bidireccional entre sus terminales MT1 y MT2, cuando se activa con un pulso de disparo de corta duración, este pulso se hace entre las terminales MT1 y la compuerta. Su desactivación sucede cuando la corriente disminuye por debajo de un nivel crítico, en los puntos de cruce por cero de las formas de onda de corriente alterna en las que se suele utilizar. Las aplicaciones más comunes para este dispositivo son el control de velocidad en motores AC de baja potencia, control de iluminación, controles de temperatura, entre otros. La figura 3 muestra el símbolo de un TRIAC.

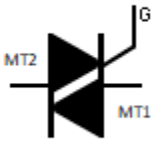


Figura 3. Símbolo TRIAC [46].

2.2.2.2 MOSFET

Transistor de Efecto de Campo de Metal Óxido-Semiconductor (por sus siglas en inglés) es un dispositivo semiconductor de tres terminales (G (compuerta), D (drenador), S (fuente)), que se utilizan para amplificar o conmutar señales eléctricas. Su funcionamiento se basa en el control del flujo de corriente entre dos de sus terminales (D y S) utilizando el campo eléctrico que se establece cuando se aplica un voltaje V_{GS} entre las terminales G y S. Este campo eléctrico genera el desplazamiento en los portadores del canal y permite el flujo de corriente, que es directamente proporcional al voltaje aplicado, para su activación se requiere una corriente muy baja. Se usa en aplicaciones con altas velocidades de conmutación.

Por su construcción, los MOSFET pueden ser de enriquecimiento o de agotamiento; en los primeros se utiliza un voltaje V_{GS} positivo para operar el transistor y en el segundo se utiliza un voltaje V_{GS} negativo.

Los MOSFET pueden ser de dos tipos:

Canal N: En este tipo de MOSFET, los portadores mayoritarios de carga son electrones, la tensión aplicada entre G y S genera un ensanchamiento del canal, y aumenta la corriente que fluye a través del dispositivo. La figura 4 muestra los símbolos para los MOSFET de canal N.

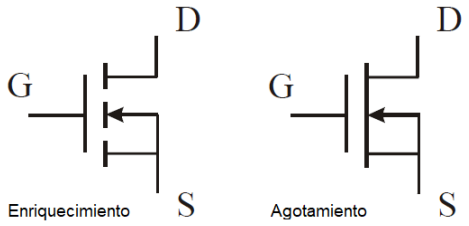


Figura 4. Símbolos MOSFET canal N [46].

Canal P: En este tipo de MOSFET, los portadores mayoritarios de carga son huecos, la tensión aplicada entre G y S genera un estrechamiento del canal, como consecuencia de esto disminuye la conductividad del canal, esto reduce la corriente

que fluye a través del dispositivo. La figura 5 muestra los símbolos para los MOSFET de canal P.

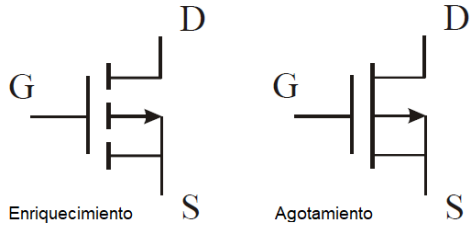


Figura 5. Símbolos MOSFET canal P [46].

Cabe destacar que los MOSFET más utilizados en la electrónica de potencia son los de enriquecimiento de canal N, ya que sus velocidades de conmutación son más elevadas que las de los otros tipos.

2.2.2.3 IGBT

El Transistor Bipolar de Compuerta Aislada (por sus siglas en inglés) es un dispositivo semiconductor de potencia de tres terminales (E (emisor), C (colector), G (compuerta)) que combina las características de un transistor bipolar y de un MOSFET. Está diseñado para controlar y amplificar señales eléctricas de alta potencia. La corriente fluye entre el Colector y el emisor cuando se encuentran sometidos a la diferencia de potencial correcta, y se aplica un voltaje positivo a la compuerta. Son muy utilizados en la electrónica de potencia gracias a su alta capacidad en voltaje y corriente, altas velocidades de conmutación y bajas pérdidas en este proceso, además la corriente requerida para su activación es muy baja al igual que en los MOSFET. Se utilizan en variadores de velocidad y en inversores de voltaje. En la figura 6 se puede ver el símbolo del IGBT.

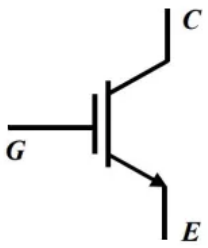


Figura 6. Símbolo IGBT [46].

Capítulo 3: Descripción general de la solución propuesta.

En esta sección se describe cada una de las etapas que conforman el banco de pruebas de bajo costo para la realización de prácticas remotas en Electrónica de Potencia, enfocado hacia IoT y utilizando código abierto. La implementación del sistema se llevó a cabo siguiendo la metodología detallada en el diagrama de flujo que se presenta en la figura 7.

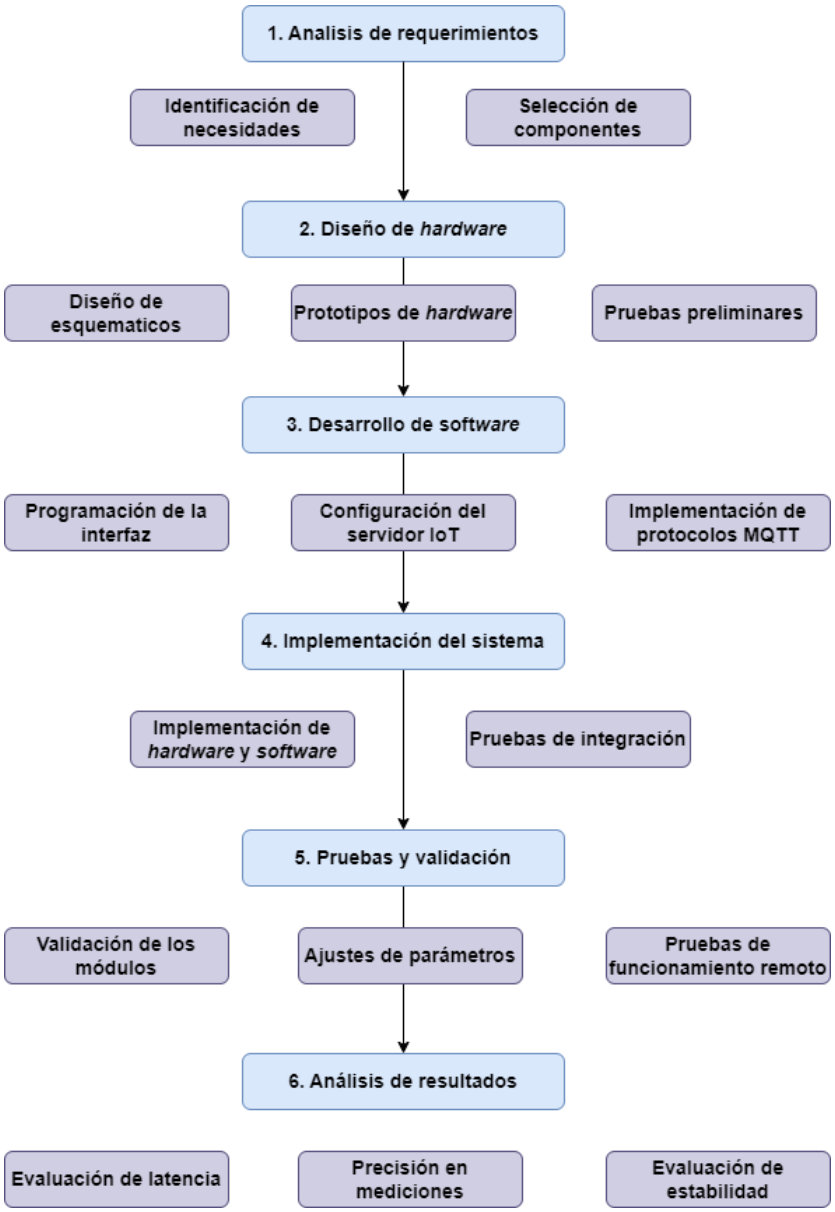


Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología utilizada en la realización del proyecto.

En la figura 8, se observa el sistema conformado por una serie de tarjetas o módulos, que permiten la realización de las prácticas de manera remota.

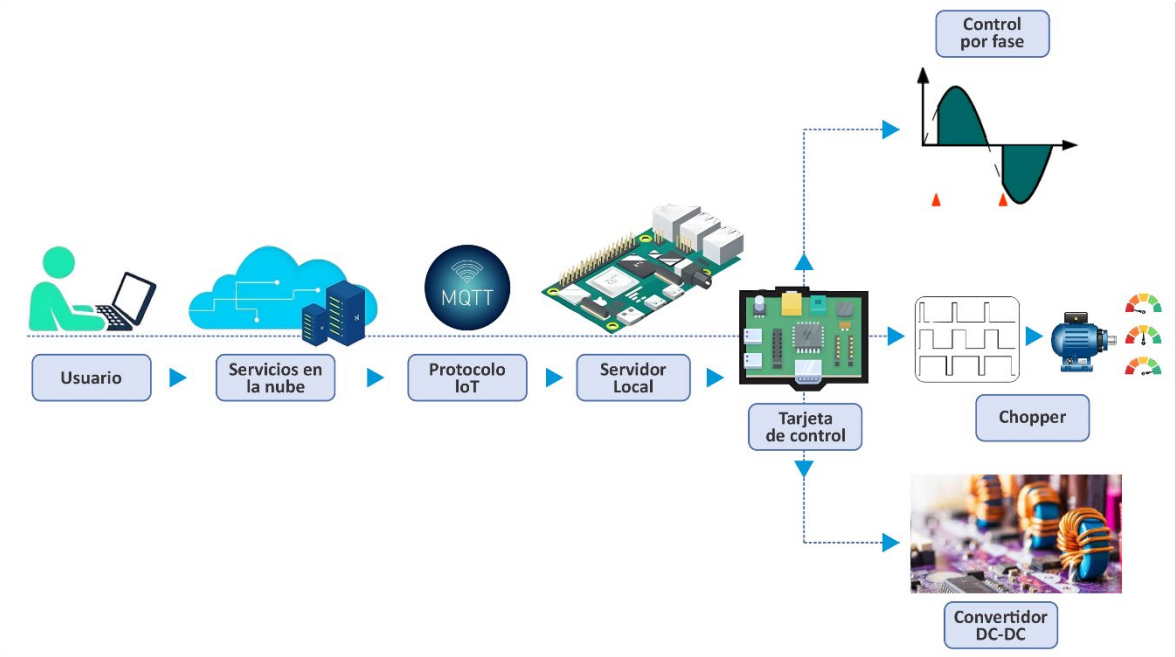


Figura 8. Sistema implementado.

El módulo de control por fase utiliza un convertidor AC-AC que varía el voltaje en la carga, modificando el tiempo de conducción de un Tiristor; para esto, se diseñó una tarjeta que utiliza un microcontrolador, un opto TRIAC [47], un TRIAC, un módulo de medición de voltaje y un transformador con derivación central. El microcontrolador se comunica con la tarjeta maestra para recibir el valor correspondiente al ángulo de disparo y para enviar el valor de voltaje medido en la carga. Con este valor y la señal del voltaje del transformador, el microcontrolador genera una señal de disparo para el TRIAC, que está sincronizada con la red eléctrica. Además, se utiliza una lámpara incandescente como elemento de carga.

El módulo de control de velocidad para un motor DC utiliza un convertidor DC-DC tipo Chopper, que varía el voltaje de polarización en la armadura del motor modificando el ciclo de dureza de la señal que lo alimenta. Se diseñó para este módulo una tarjeta que utiliza un microcontrolador, un opto acoplador [47] de alta velocidad y un transistor MOSFET. El módulo se alimenta con una fuente DC de 65 V que se utiliza como voltaje de armadura en un motor de tipo industrial, que incluye un *encoder* rotativo acoplado a su eje para la medición de velocidad. El microcontrolador se comunica con la tarjeta maestra mediante un protocolo serial para recibir el valor del ciclo de dureza de una señal PWM que controla el motor y enviar el valor de velocidad en RPM (Revoluciones Por Minuto).

El módulo del convertidor DC-DC tipo Buck utiliza una topología que permite generar un voltaje variable entre 0-10 V y permite la conexión de cargas en paralelo para variar la corriente. Se diseñó una tarjeta que utiliza un microcontrolador, opto acopladores, transistores, un driver de disparo para transistores, relevos, resistencias de potencia, además de sensores de voltaje y corriente para la medición de estas variables. El microcontrolador se comunica por medio un protocolo serial con la tarjeta maestra para recibir el valor de voltaje que se requiere y activar las resistencias de carga; además, el microcontrolador envía los valores de voltaje y corriente medidos por los sensores a la tarjeta maestra. Este módulo se alimenta con 20V DC de una fuente externa.

La tarjeta maestra funciona como intermediaria entre el servidor local y los diferentes módulos de prácticas; la tarjeta diseñada incluye un puerto de comunicación con el servidor local, una pantalla OLED (*Organic Light Emitter Diode*), dos relevos de propósito general junto con su *driver*, y un puerto de comunicación para los módulos de práctica. La alimentación de esta tarjeta puede hacerse con una fuente externa de 5V DC, o a través del puerto de comunicación con el servidor local.

El servidor local se implementó con un SBC (*Single Board Computer*), en este caso una Raspberry Pi 4B, a la cual se le instaló un sistema operativo libre optimizado para este tipo de dispositivos, Raspbian Buster de 32 bit [48]. Sobre este sistema se instaló el servicio Node-Red, que se encarga de crear nodos de comunicación entre la Raspberry, la tarjeta maestra y un servidor en la nube que almacena los datos para comunicarse con la plataforma web encargada de la interacción con el usuario.

Se instaló un servicio MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) de código libre llamado Mosquitto para la conexión entre el servidor local y el servidor remoto [49]. Este garantiza un *broker* que permite la interconexión de las variables de interés entre los servidores con un tiempo de respuesta relativamente rápido comparado con los servicios de pago en la nube.

En la etapa de usuario, se desarrolló una aplicación web creada usando la librería React. Esta aplicación permite al estudiante validar su registro al laboratorio remoto usando usuario y contraseña. Cuando el estudiante accede a la plataforma, debe evaluar conocimientos previos que le permita establecer si posee o no los conocimientos necesarios para realizar la práctica.

Superada esta etapa, se redirecciona al estudiante a la plataforma de servicios en la nube.

3.1 Implementación de la solución propuesta.

En este capítulo se describen de manera detallada los aspectos correspondientes al diseño de los módulos que conforman las diferentes etapas del sistema implementado.

3.1.1 Módulos de práctica:

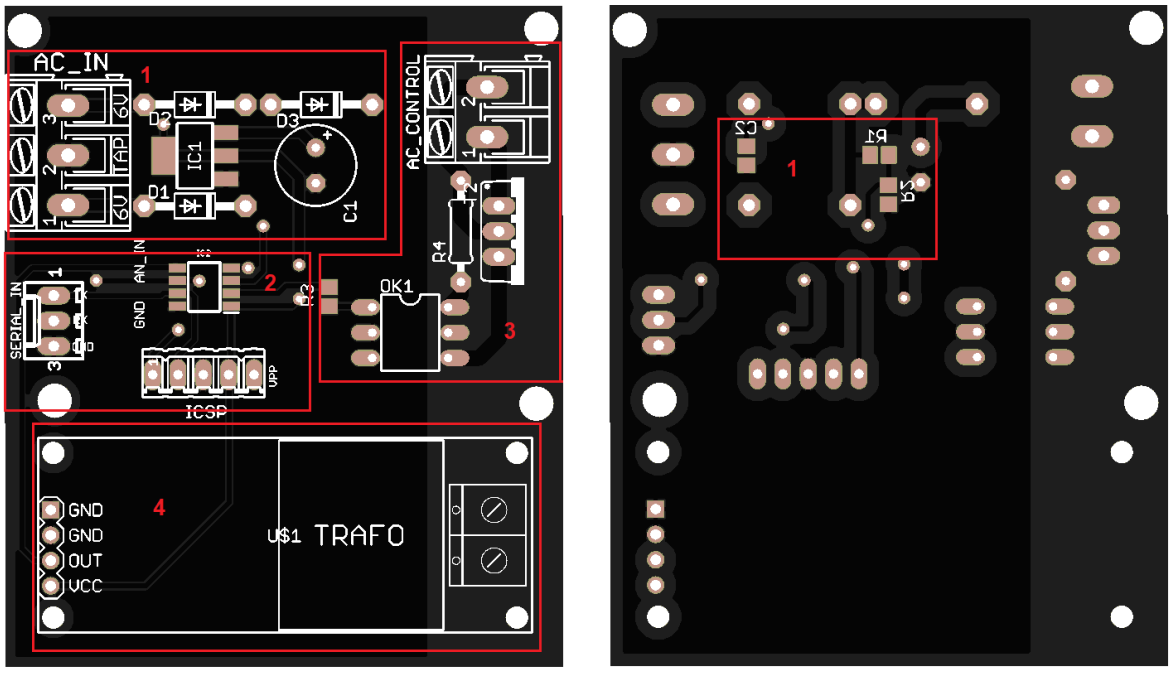
A continuación, se muestran las componentes de cada módulo de práctica, las tarjetas y los demás elementos que del módulo.

3.1.1.1 Módulo de control por fase:

Este módulo está constituido por tres componentes, los cuales se describen a continuación:

Tarjeta electrónica:

Esta tarjeta se compone de cinco etapas. Para el montaje de los componentes se diseñó un circuito impreso PCB (por sus siglas en inglés), como se puede apreciar en la figura 9.



(a) (b)

Figura 9. Circuito impreso para la tarjeta del módulo de control por fase (a) vista superior, (b) vista Inferior.

Las etapas de la tarjeta resaltadas en rojo se enumeran a continuación:

1. Polarización
2. Control
3. Potencia
4. Medición

1.Polarización de la tarjeta:

Este circuito se compone de un puente rectificador de onda completa, que utiliza la señal AC de un transformador con derivación central de 6V, que alimenta un regulador AMS117 de 5V con sus respectivos capacitores de desacople (0.1µF). El circuito incluye además un diodo 1N4007 que se encarga de aislar la señal pulsada de los cruces por cero y así proporcionar un voltaje de alimentación estable para el microcontrolador. Se utilizan también dos resistencias en serie, como divisor de tensión, para llevar esta señal a un puerto de entrada del microcontrolador, con el fin de detectar los puntos donde la señal tiene un valor de 0V, y así generar una sincronía con la red eléctrica de 60 Hz. La figura 10 contiene el esquemático del circuito de polarización de la tarjeta.

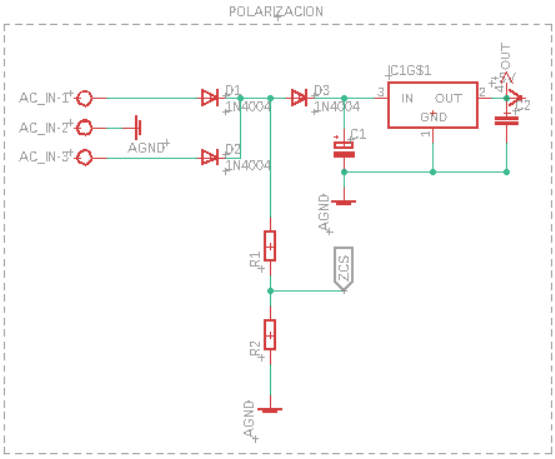


Figura 10. Etapa de polarización para la tarjeta de control por fase.

2.Control:

Esta etapa se compone de un microcontrolador PIC12F1822 [50], que puede programarse mediante un puerto ICSP (*In Circuit Serial Programming*) [51]. El microcontrolador recibe de la tarjeta maestra el valor correspondiente al ángulo de disparo del TRIAC y genera la señal de activación para el circuito de potencia; el

microcontrolador también recibe la señal del sensor de voltaje para procesarla, obtener el valor RMS y enviarlo a la tarjeta maestra. La conexión del módulo con esta tarjeta se hace a través de un conector Molex de 3 pines utilizando el protocolo de comunicación serial RS-232. La figura 11 contiene el esquemático para la etapa de control de la tarjeta.

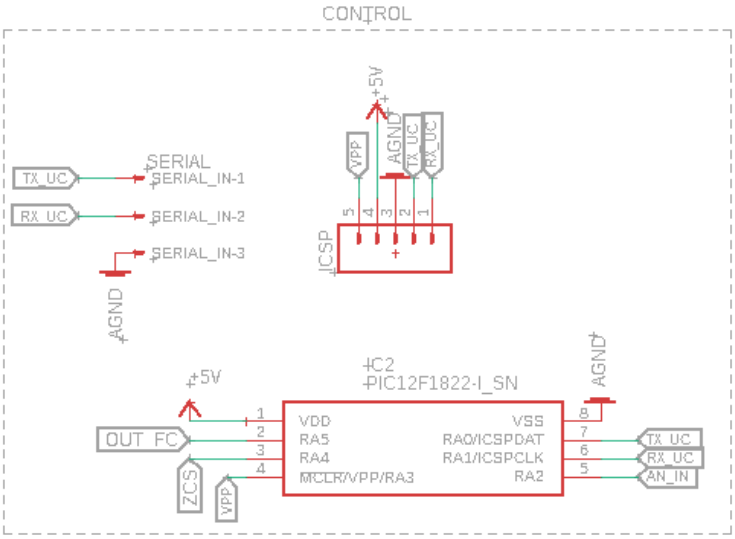


Figura 11. Etapa de control para la tarjeta de control por fase.

3.Potencia:

La etapa de potencia incluye un opto TRIAC (sin detección de cruce por cero) MOC3021, que recibe la señal de activación proveniente del microcontrolador. Este dispositivo se encarga de aislar la etapa de control de la etapa de potencia, permitiendo la activación del TRIAC BT134-600G (el esquemático de este circuito se muestra en la figura 12.). Este TRIAC se escogió por sus características eléctricas adecuadas para el elemento de carga utilizado en el módulo de control por fase y son descritas a continuación:

- V_{DRM} máximo: 600V.
- $I_{T(RMS)}$ máxima: 4A.
- I_{GT} : 35 mA.

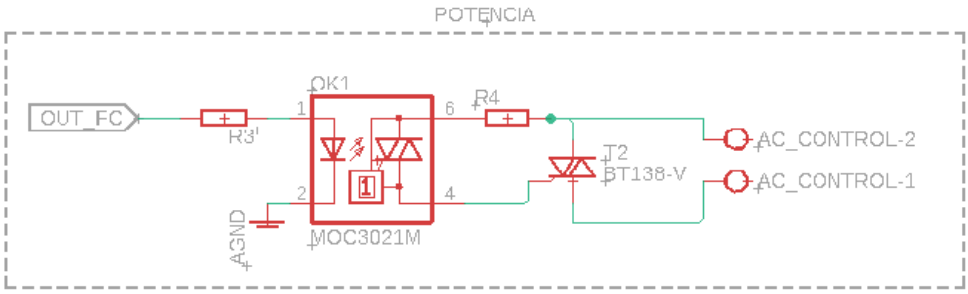


Figura 12. Etapa de potencia para la tarjeta de control por fase.

4.Medición:

Esta etapa utiliza el módulo ZMPT101B [52] para la medición del voltaje AC en la carga, está diseñado para operar en el rango de 110V - 220V de manera segura, ya que utiliza un pequeño transformador y un amplificador operacional para generar una salida analógica proporcional al voltaje de entrada añadiendo un *offset* ajustable desde una resistencia variable; este *offset* permite al microcontrolador procesar la señal sin necesidad de tener fuentes de polarización negativas y proporciona un aislamiento galvánico entre la corriente AC y el puerto de conversión análogo-digital del microcontrolador. En la figura 13 se muestra el esquemático de la etapa de medición.

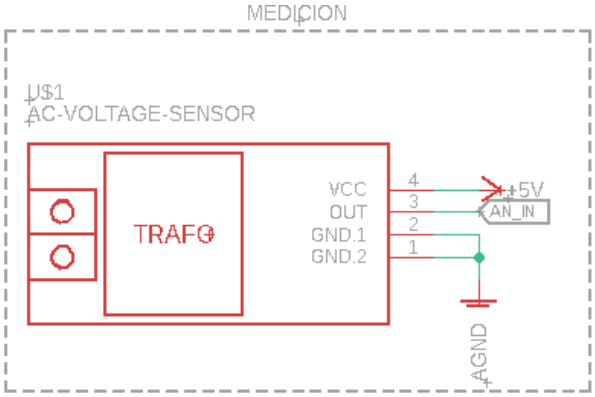


Figura 13. Etapa de medición para la tarjeta de control por fase.

.

La tarjeta ensamblada se muestra a continuación en la figura 14.



Figura 14. Tarjeta ensamblada para el módulo de control por fase.

Transformador:

Se utilizó un transformador de baja corriente con derivación central de 110 a (6V-0V-6V) para la fuente de polarización de la tarjeta de control por fase y la detección de los cruces por cero de la señal. El transformador utilizado se muestra en la figura 15.



Figura 15. Transformador utilizado en el módulo de control por fase.

Carga:

Como elemento de carga en el módulo de control por fase, se utilizó una bombilla incandescente de 120V/60W (figura 16), ya que se requiere una carga resistiva, además el cambio de la cantidad de luz ofrece una percepción visual del cambio en el voltaje.



Figura 16. Bombilla Incandescente utilizada en el módulo de control por fase.

3.1.1.2 Módulo de control de velocidad de un motor DC:

Este módulo está constituido por 6 elementos, los cuales se describen a continuación:

Tarjeta electrónica (*chopper*):

Esta tarjeta se compone de tres etapas, se diseñó un circuito impreso PCB para el montaje de los componentes, como se puede apreciar en la figura 17.

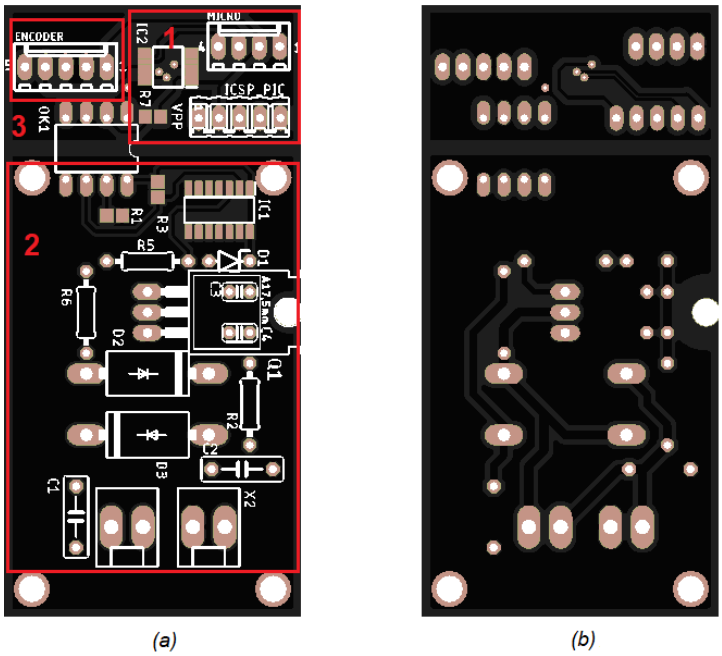


Figura 17. Circuito impreso para la tarjeta del módulo de control de velocidad de un motor DC (a) vista superior, (b) vista Inferior.

Las etapas de la tarjeta resaltadas en rojo se enumeran a continuación:

1. Control
2. Potencia
3. Medición

1.Control:

Este circuito se compone de un microcontrolador PIC18F06Q40, que puede programarse mediante un puerto ICSP. La polarización de esta etapa de la tarjeta se hace por medio del conector de comunicación con la tarjeta maestra, este suministra 5V para la alimentación del microcontrolador y el *encoder.*

El microcontrolador cumple varias funciones, entre las que se encuentran:

- De la tarjeta maestra recibe un valor entre 0-100% correspondiente al ciclo de dureza de la señal, con este valor genera una señal PWM a 10 KHz; este valor se escogió para evitar los sonidos nocivos que se generan al operar el motor a una frecuencia cercana a los 6KHZ. Esta señal activa un opto acoplador de alta velocidad y es transferida a la etapa de potencia, obteniendo así un aislamiento entre esta etapa y la de control.
- Recibe un tren de pulsos del *encoder,* correspondiente a la velocidad de giro del motor, con este calcula la velocidad en RPM utilizando la siguiente ecuación 1:
-

$$V_{RPM}: \frac{60\ x\ Frecuencia(Hz)}{Numero\ de\ pulsos\ por\ vuelta} \qquad (1)$$

- Envía el valor de velocidad en RPM a la tarjeta maestra.

  En la figura 18 se muestra el esquemático del circuito para la etapa de control.

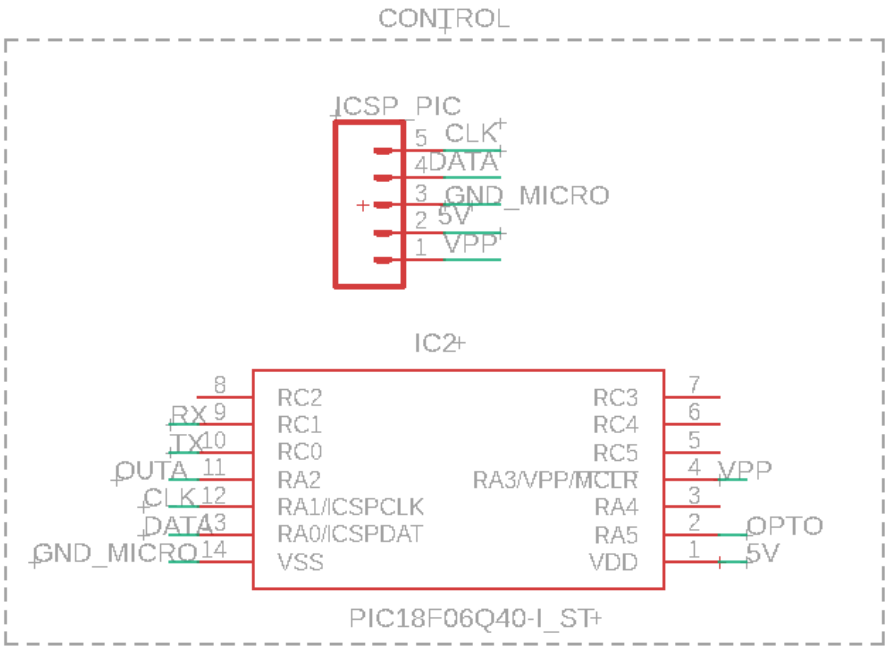


Figura 18. Etapa de control utilizada en el chopper.

2.Potencia:

La primera parte de esta etapa consiste en una fuente de baja corriente de 15V para polarizar el opto acoplador rápido 6N136 [53] y el circuito integrado CD4011 [54]. Esta se implementó aprovechando la fuente de alimentación externa que se conecta a la tarjeta (65V/50A), este voltaje es regulado con el uso de un diodo Zener de 15 V/1W, una resistencia de 10KΩ/0.5W y sus debidos capacitores de desacople (1µF y0.1µF). El optoacoplador recibe la señal de la etapa de control y la lleva al circuito integrado, con el fin de invertir y recomponer la señal para la segunda parte de esta etapa. El circuito encargado de la conmutación de potencia está conformado en primer lugar por un transistor MOSFET IRF840, escogido para este fin por sus características eléctricas adecuadas para soportar las condiciones de trabajo con el motor disponible [55]:

- V_{DS} máximo: 500V
- $R_{DS\ (on)}$: 0.85Ω
- I_S máxima: 8A
- V_{GS} ±20V
- Alta velocidad de conmutación

En segundo lugar, se tiene una red *SNUBBER* [56] para proteger al transistor de los picos de voltaje y corriente que se generan durante el proceso de conmutación; dicha red está conformada por un diodo rápido 1N5408, un capacitor de 2.2ηf y una resistencia de 15KΩ/0.5w, obtenidos siguiendo el procedimiento sugerido en [57].

El esquemático correspondiente a esta etapa se muestra en la figura 19

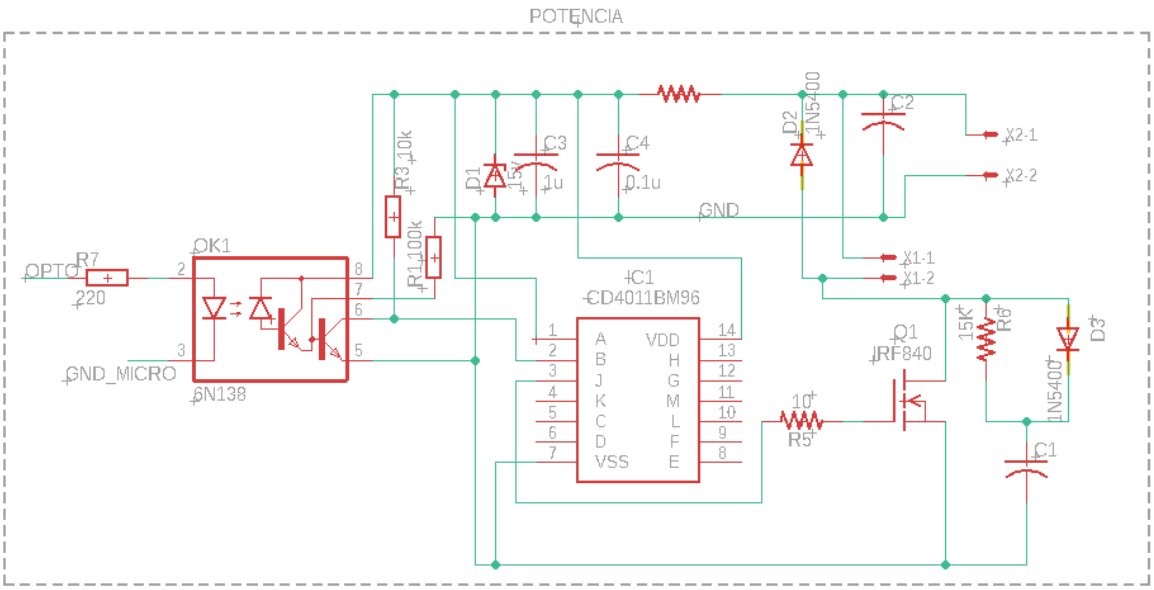


Figura 19. Etapa de potencia utilizada en el chopper.

3.Medición:

La medición de velocidad se hizo acoplando al motor un *encoder* rotativo marca OMRON de referencia E6B2-CWZ6C (figura 20). Este *encoder* es de tipo incremental y genera 2000 pulsos por vuelta; se utilizó un conector Molex de 5 pines para su conexión a la tarjeta, que entrega un voltaje de polarización (5VDC). La tierra del circuito se conecta a la del *encoder* y al blindaje del cable para prevenir ruidos externos que puedan afectar el tren de pulsos. En los 2 pines restantes se conectan las salidas A y B del *encoder*, de las cuales se toma solo una y se lleva al microcontrolador, donde se activan las resistencias internas de *pull-up*, ya que su salida es de tipo colector abierto.



*Figura 20. Encoder OMRON E*6B2-CWZ6C [58].

La tarjeta ensamblada se muestra a continuación en la figura 21.



Figura 21. Tarjeta ensamblada para el módulo de control de velocidad de un motor DC.

Fuente de alimentación:

La etapa de potencia de la tarjeta se polariza utilizando una fuente DC, marca HP-6459. Es una fuente de tipo Industrial, robusta, variable entre 0-60V y 0-65A, para suministrar los niveles de voltaje y corriente a esos niveles utiliza un puente trifásico semicontrolado con 3 SCR y 3 diodos de alta corriente. Se alimenta de una línea trifásica de 220V AC. La fuente utilizada en el módulo se muestra en la figura 22.



Figura 22. Fuente utilizada para el módulo de control de velocidad de un motor DC.

Motor DC:

El motor que hace parte del módulo, es de tipo industrial, marca Baldor de 1.5 HP, con un voltaje de armadura máximo de 180V DC y una velocidad de 1750 RPM a ese voltaje (figura 23). El campo puede polarizarse a 100V DC 0 a 200V DC dependiendo de la conexión de sus bobinas tal y como se muestra en la figura 24. Para nuestro caso se utilizó la conexión de bajo voltaje conectando las bobinas en paralelo, los 100V para la polarización del campo se consiguieron utilizando un VARIAC y un rectificador de fabricación propia como se ve en la figura 25.



Figura 23. Motor utilizado para el módulo control de velocidad de un motor DC.

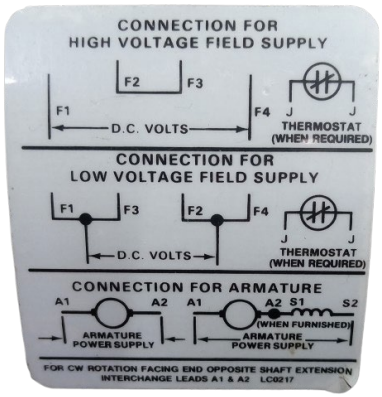


Figura 24. Diagrama de conexión para las bobinas de campo del motor DC.



Figura 25. VARIAC y rectificador.

3.1.1.3 Módulo convertidor DC-DC tipo *buck*:

Este módulo está constituido por dos elementos, los cuales se describen a continuación:

Tarjeta electrónica:

Esta tarjeta a su vez se compone de tres etapas, para el montaje de los componentes se diseñó un circuito impreso PCB, como se puede apreciar en la figura 26.

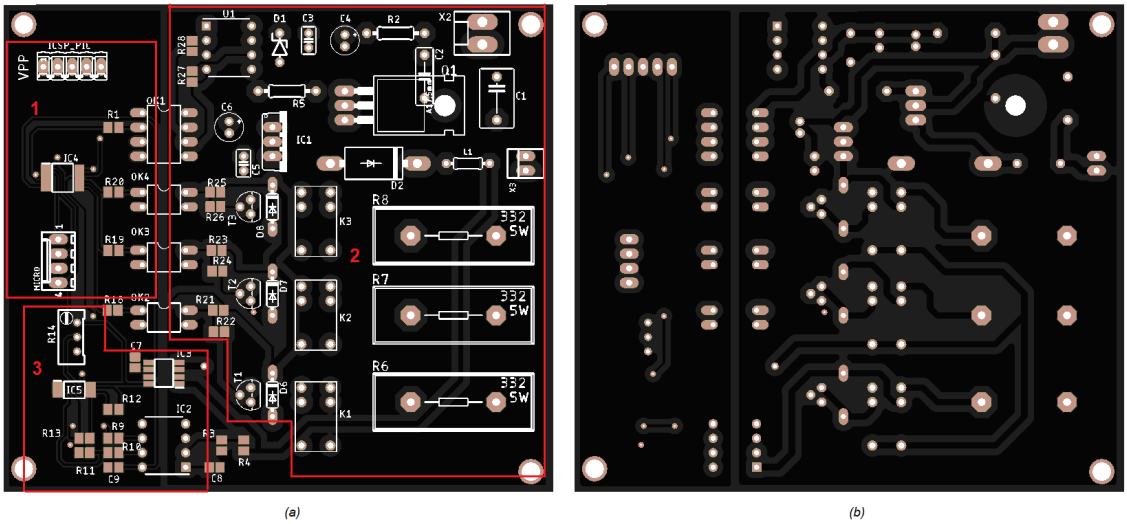


Figura 26. Circuito impreso para la tarjeta del módulo convertidor DC-DC tipo buck (a) vista superior, (b) vista Inferior.

Las etapas de la tarjeta resaltadas en rojo, se enumeran a continuación:

1. Control
2. Potencia
3. Medición

1.Control:

Esta etapa se compone de un microcontrolador PIC18F06Q40 que puede programarse mediante un puerto ICSP. La polarización de esta etapa de la tarjeta se hace por medio del conector de comunicación con la tarjeta maestra, el cual provee 5V DC para la alimentación del microcontrolador. Este cumple varias funciones, entre las que se encuentran:

- Recibe de la tarjeta maestra un valor entre 0-100% correspondiente al ciclo de dureza de la señal PWM, con este valor genera una señal PWM a una

frecuencia de 10 KHz. Esta señal activa un opto acoplador de alta velocidad, y es transferida a la etapa de potencia, obteniendo así un aislamiento entre esta etapa y la de control.

- Recibe de la tarjeta maestra las señales de activación para los opto acopladores que conmutan los relevos que conectan la carga al sistema.
- Recibe las señales de los sensores de voltaje y de corriente para escalar sus valores y enviarlos a la tarjeta maestra, para su visualización.
-

El esquemático para la etapa de control se ilustra en la figura 27.

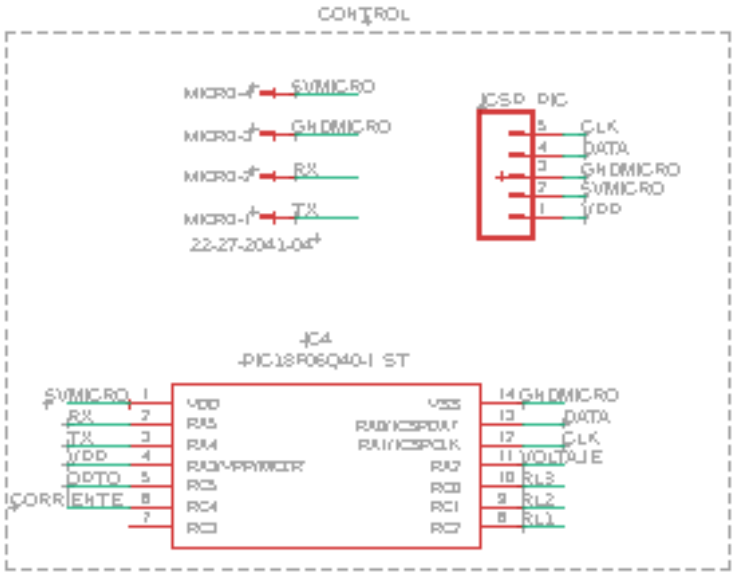


Figura 27. Etapa de control utilizada en el convertidor DC-DC tipo buck.

2.Potencia:

Esta etapa recibe la señal de PWM desde el microcontrolador que conmuta el transistor para alimentar el filtro LC, para de lograr un voltaje variable 0-10V a la salida; además de conectar la carga para generar una variación en la corriente. El esquemático para esta etapa se muestra en la figura 28.

La polarización del circuito de potencia se hizo mediante una fuente externa, que suministra 20V, este voltaje se utilizó para alimentar el circuito del convertidor DC-DC tipo Buck, para el resto de los elementos se utilizaron dos reguladores:

El primer regulador de 15V se implementó al igual que en la tarjeta anterior, con un diodo Zener de 15 V/1W, una resistencia de 10KΩ/0.5W y sus debidos capacitores de desacople (1µF y0.1µF). Este voltaje se utiliza para polarizar el opto acoplador y el driver de disparo del MOSFET. Para el segundo se utilizó un LM7805, que es un

regulador de 5V, este voltaje se utilizó para la polarización de los relevos que conectan la carga al sistema.

Este circuito recibe la señal del microcontrolador a través de un opto acoplador rápido 6N136 y la lleva al driver de disparo de alta velocidad para transistores MOSFET, el CI MC33152PG, con el fin de mejorar el desempeño del elemento de conmutación de potencia, en este caso el MOSFET IRF840 (escogido para este caso por las mismas razones que en el módulo anterior); este transistor conmuta el voltaje de entrada al arreglo del filtro LC junto con el diodo, como se muestra en la figura 25. El diodo escogido es un diodo rápido 1N5408, los valores escogidos para el filtro LC resultan de la ecuación 2:

$$Frecuencia_{Hz}: \frac{1}{2*\pi*\sqrt{LC}} \text{ [59]} \quad (2)$$

La frecuencia de la señal PWM generada por el microcontrolador es de 10 KHz, pero para eliminar las frecuencias hasta el primer armónico par presente, el doble de la frecuencia utilizada; se sintonizó el filtro LC a 20 KHz.

Escogiendo el valor de L: 0.1mH
Se tiene para C: 0.633uF
Se escoge el valor comercial más cercano: 0.47uF

La carga para el módulo, consta de tres resistencias de 33Ω/5W, que se pueden conectar de manera independiente, con el uso de relevos accionados por el microcontrolador, mediante 3 opto acopladores PC817, que a su vez activan tres transistores PNP 2N3906.

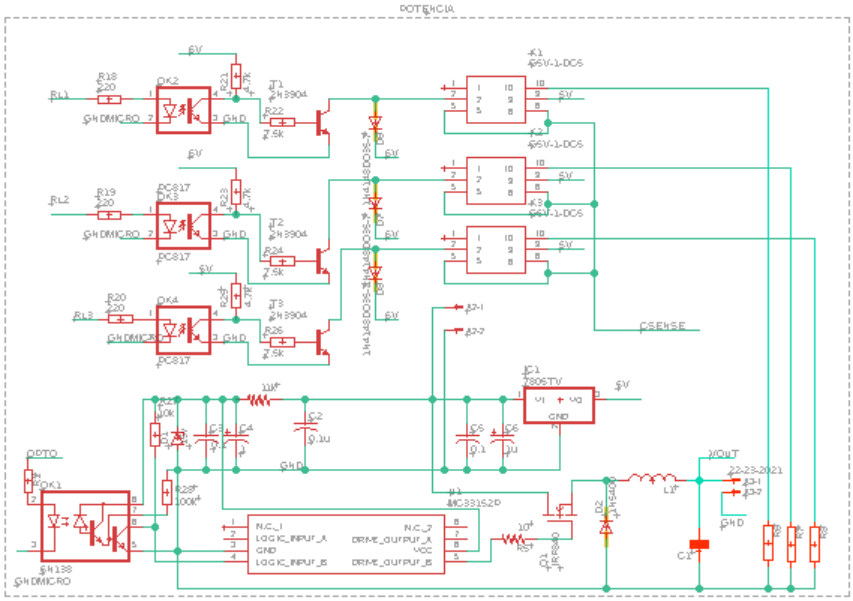


Figura 28. Etapa de potencia utilizada en el convertidor DC-DC tipo buck.

3.Medición:

Esta etapa se encarga de medir el voltaje y la corriente sobre la carga del módulo para entregarlos al microcontrolador y realizar el escalamiento adecuado. En el circuito de medición de voltaje se utilizó el amplificador de aislamiento ACPL-7900 [60] ya que está diseñado para entregar una señal de salida proporcional a una señal de entrada analógica, con aislamiento galvánico entre la entrada y la salida. La entrada máxima de voltaje de este dispositivo está en el rango de ±200 mV. Debido a que la salida generada por el convertidor DC-DC esta entre 0-10V, se utilizaron dos resistencias para hacer un divisor de tensión (5.1KΩ y 510KΩ) proporcional al voltaje de entrada; la salida de este amplificador es en modo diferencial, para convertirlo a modo común se utilizó un amplificador operacional LM358 [61] y un *trimmer* de 100KΩ para hacer el ajuste de ganancia. En el circuito de medición de corriente se utilizó el sensor ACS712ELCTR-05B-T [62]. Este sensor ofrece aislamiento galvánico entre la medición de corriente y el voltaje de salida ya que funciona haciendo uso del efecto Hall para detectar el campo magnético generado por la corriente que circula en el circuito y produce una salida proporcional a la corriente, de 185 mV/A, con un *offset* de Vcc/2. En la figura 29 se muestra el esquemático para la etapa de medición.

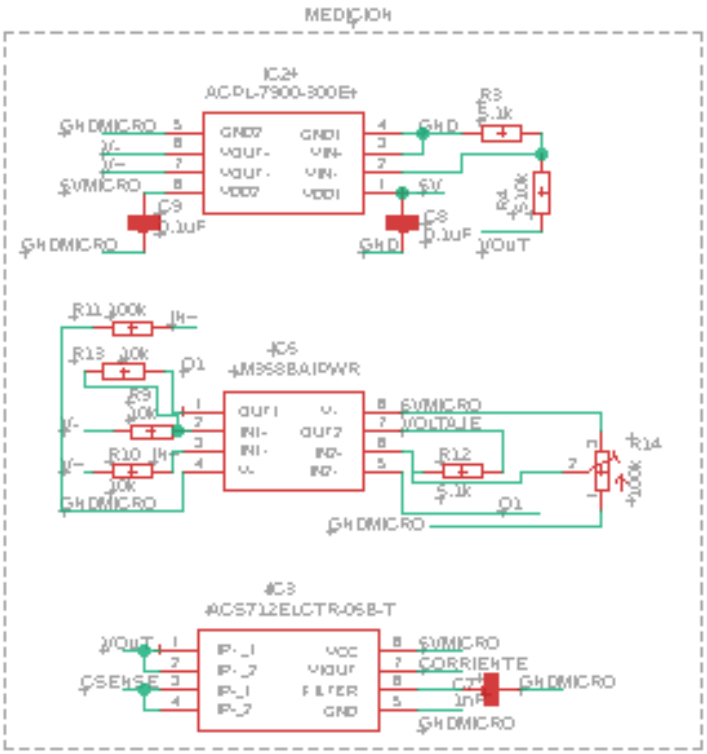


Figura 29. Etapa de medición utilizada en el convertidor DC-DC tipo buck.

La tarjeta ensamblada se muestra a continuación en la figura 30.



Figura 30. Tarjeta ensamblada para el módulo convertidor DC-DC tipo buck.

Fuente de alimentación:
La polarización de la etapa de potencia del módulo se hizo utilizando la fuente DC BK Precision 1671A variable entre 0-32V y 0-5 A, mostrada en la figura 31.



Figura 31. Fuente utilizada para polarizar el convertidor DC-DC tipo buck.

3.1.2 Tarjeta maestra:

Esta tarjeta se encarga de comunicar los módulos de prácticas con el servidor local; recibe las señales de control para enviarlas a los microcontroladores de los módulos utilizando el protocolo de comunicación serial RS-232, a través de este mismo protocolo recibe los datos de las mediciones de los módulos para enviarlos al servidor local para su procesamiento y posterior visualización en la plataforma web.

La tarjeta maestra se compone de cinco etapas, para el montaje de los componentes se diseñó un circuito impreso PCB, como se puede apreciar en la figura 32.

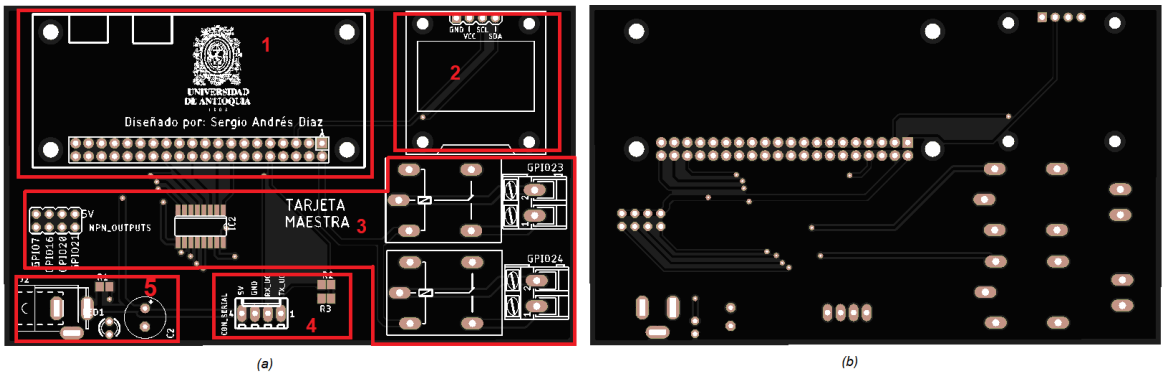


Figura 32. Circuito impreso para la tarjeta maestra (a) vista superior, (b) vista Inferior.

Las etapas de la tarjeta resaltadas en rojo, se enumeran a continuación:

1. Comunicación con el servidor local
2. Visualización
3. Salidas de propósito general
4. Comunicación con los módulos
5. Alimentación.

1. Comunicación con el servidor local:

Esta etapa consta de un conector tipo *Pin-Header* de montaje vertical de 40 pines para conectarse directamente al servidor local (Raspberry PI 4) a través del cual se envían y reciben los datos; en este conector también brinda la posibilidad de un voltaje de polarización alternativo para la tarjeta. El esquemático se muestra en la figura 33.

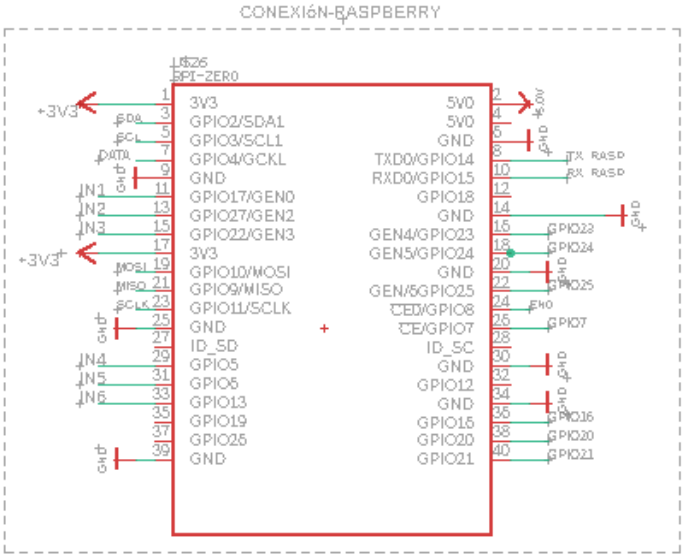


Figura 33. Etapa de conexión con el servidor local de la tarjeta maestra.

2.Visualización:

Esta etapa se compone de una pantalla OLED de 1”, que se comunica con el servidor local a través del protocolo serial I2C y por medio de la cual se puede visualizar que práctica ha sido seleccionada por el usuario para conectar el módulo a utilizar. El esquemático se muestra en la figura 34.

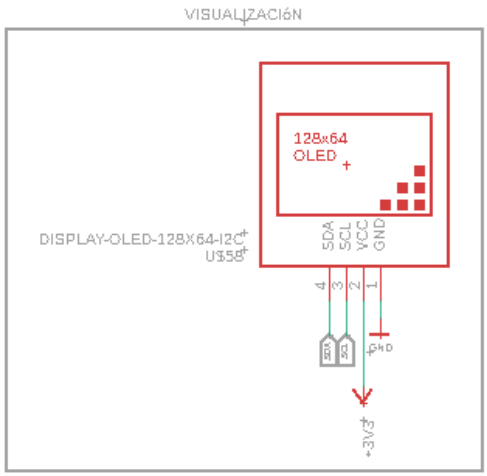


Figura 34. Etapa de visualización de la tarjeta maestra.

3.Salidas de propósito general

Esta etapa se compone de un circuito integrado ULN2003 [63] que consta de un arreglo de transistores *darlington* con 7 salidas tipo colector abierto para manejar corrientes de hasta 500 mA, 5 de estas están disponibles en un conector tipo *Pin-Header* y ofrecen la posibilidad de ser utilizadas para propósitos diversos tales como salidas PWM y accionamientos de diversos dispositivos, las otras dos salidas activan relevos para accionar cargas AC o DC de hasta 7A. El esquemático para esta etapa se muestra en la figura 35.

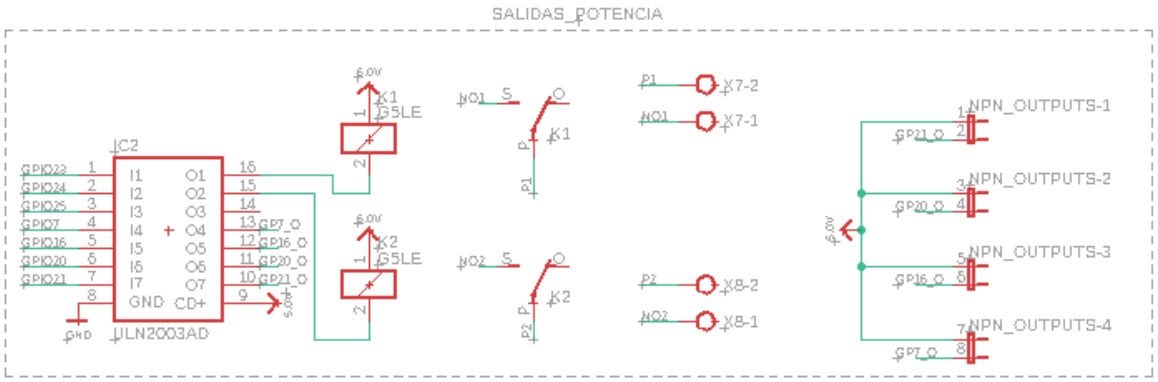


Figura 35. Salidas de propósito general de la tarjeta maestra

4.Comunicación con los módulos:

La etapa de la tarjeta tiene un conector Tipo Molex de 4 pines, que comunica en serie con los microcontroladores de los módulos, usando el protocolo de comunicación serial RS-232, además del voltaje de polarización de 5VDC. Esta cuenta con dos resistencias de 1KΩ y 2K para hacer un divisor de tensión en el pin de transmisión que va a la Raspberry, con el fin de protegerla ya que esta soporta voltajes de entrada en los GPIO (*General Purpose Input Output*) de máximo 3.3V, y los voltajes de salida de los microcontroladores son de 5V. El esquemático para esta etapa se muestra en la figura 36.

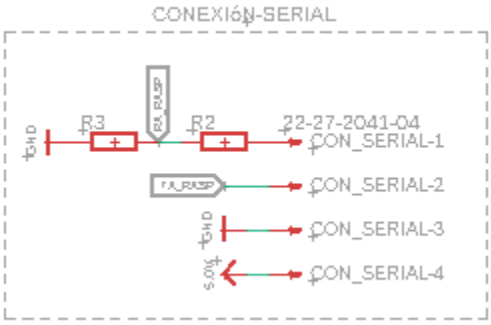


Figura 36. Comunicación serial de la tarjeta maestra

5.Alimentación:

Esta etapa de la tarjeta está conformada por un conector tipo Jack de 5mm, un capacitor de desacople de 100µF y un led indicador de conexión, como se muestra en la figura 37. Estos permiten alimentar simultáneamente la tarjeta maestra y la Raspberry utilizando un adaptador de 5VDC.

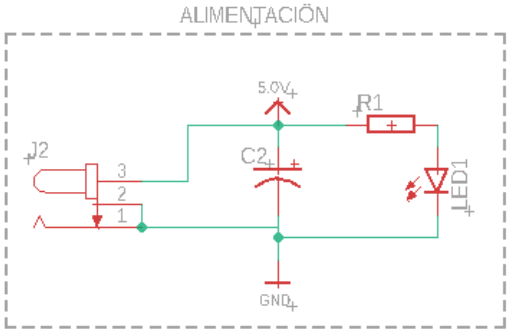


Figura 37. Etapa de alimentación adicional para la tarjeta maestra

La tarjeta ensamblada se muestra a continuación en la figura 38.



Figura 38. Tarjeta maestra ensamblada.

3.1.3 Servidor Local:

El servidor local para el banco de pruebas, se implementó en un SBC, en este caso la Raspberry Pi 4B [64] (figura 39), la cual fue seleccionada por sus prestaciones y características, dentro de las cuales se encuentran:

- Procesador: Broadcom BCM2711, tipo *Quad-Core* Cortex-A72 (ARM v8) de 64 bits a 1.5 GHz.
- Memoria RAM: 2 GB de RAM LPDDR4.
- Ethernet: *Gigabit ethernet.*
- Wi-Fi: 802.11ac de doble banda (2.4 GHz y 5 GHz).
- Bluetooth 5.0 BLE.
- Cuatro puertos USB (dos USB 3.0 y dos USB 2.0).
- HDMI: Dos puertos micro-HDMI que soportan hasta 4K de resolución.
- GPIO: Conector tipo *Pin Header* de 40 pines.

Esta elección se hizo basado en criterios tales como:

- **Flexibilidad:** Es compatible con varios sistemas operativos, como Raspberry Pi OS, Ubuntu, LibreELEC entre otros (todos de código abierto); permite la conexión de múltiples dispositivos y periféricos a través de los GPIO.
- **Compacta y de bajo costo:** Brinda todas las prestaciones de un computador tradicional: Puertos HDMI, USB y conectividad tanto cableada como

inalámbrica en un espacio reducido con un precio muy bajo. Además, se puede configurar para trabajar en modo consola sin necesidad de periféricos tales como teclado y pantalla.

- **Comunicaciones:** Soporta protocolos a nivel de capa física de forma nativa tales como RS-232, I2C, SPI, One-Wire, que no están disponibles en sistemas de cómputo tradicionales.
- **Comunidad y soporte:** Cuenta con una amplia comunidad de usuarios y un gran número de recursos disponibles en línea, incluyendo tutoriales, foros y bibliotecas de software.



Figura 39. Raspberry Pi 4B [64]

3.1.3.1 Configuración de red:

Para el acceso a las redes, la Raspberry posee dos opciones, la primera es el adaptador Wi-Fi. Este fue configurado para conectarse a un enrutador vía inalámbrica y proveer el acceso a internet del sistema; la segunda es el adaptador *ethernet*, este fue configurado con una dirección IP fija, para poder acceder fácilmente de manera remota desde un computador configurado dentro de la misma Red, con el fin de realizar las validaciones y modificaciones concernientes a los servicios de red.

Para las configuraciones del sistema se utiliza un cliente SSH que permite instalar software y configurar parámetros mediante comandos de consola. En caso de requerirse acceso al escritorio de la Raspberry se utiliza un servicio llamado VNC que hace parte del sistema operativo y solo requiere ser activado al momento de la configuración inicial.

El acceso a la aplicación de usuario se hace utilizando un navegador web mediante la dirección IP y el puerto 1880 asignado al servicio Node-Red.

3.1.3.2 Servicios de red:

Para implementar los servicios en el servidor local se utilizó la herramienta Node-Red, el cual es una plataforma de código abierto fácil de implementar sobre el sistema operativo instalado (Raspbian Buster), que permite realizar la programación haciendo uso de una serie flujos de trabajo y que a su vez contienen bloques compuestos por nodos, y se configuran de acuerdo con la función que se desea realizar. Cada uno de estos flujos tiene asociado una interfaz gráfica que permite a los usuarios visualizar y controlar datos en tiempo real llamada Dashboard, haciendo uso de elementos interactivos conocidos como widgets.

El programa hecho en Node-Red se divide en 4 flujos de trabajo principales los cuales se describen a continuación:

Control de Raspberry: Este flujo de trabajo contiene dos bloques permiten apagar o de reiniciar la Rasberry, utilizando comandos ejecutados directamente en la consola del sistema operativo, con permisos de administrador. En la figura 40 se muestra este flujo de datos.

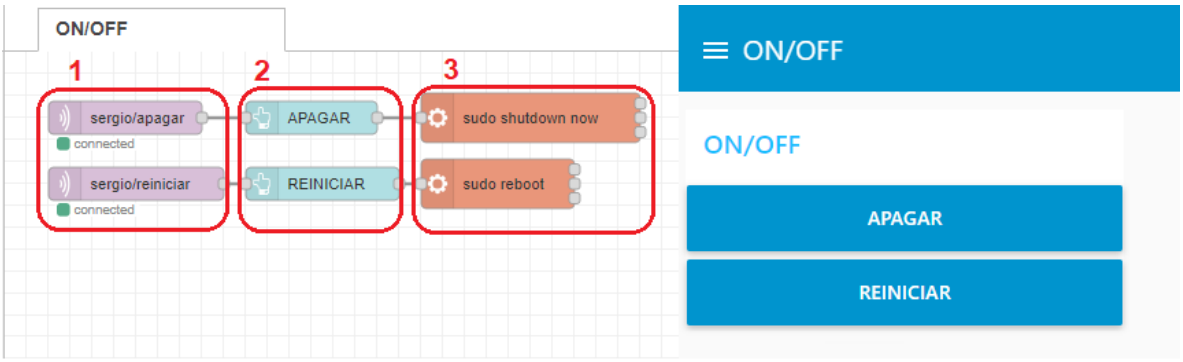


Figura 40. Flujo de trabajo para el control de la Raspberry
(a) bloques de nodos, (b) dashboard.

Las funciones de los nodos dentro del flujo de control que se muestran en la figura 37, encerradas con rectángulos rojos se listan a continuación:

1.Nodos de entrada MQTT: Se encargan de recibir los datos que vienen del *broker* para integrarlos dentro del servidor local.

2.*Widgets* de *dashboard*: Son los encargados de la interacción con el usuario en la interfaz gráfica, cuando son pulsados ingresan un valor al programa para que se ejecute la función que tienen conectada a la salida.

3. Nodos de ejecución: Se encargan de ejecutar un comando del sistema, en este caso los comandos para apagar o reiniciar la Raspberry.

Control por fase: Este flujo de trabajo contiene tres bloques: el primero se encarga de recibir el valor correspondiente al ángulo de disparo desde la interfaz de usuario para enviarlo a la tarjeta maestra, el segundo bloque se encarga de recibir el valor de voltaje desde la tarjeta maestra para su visualización en el *dashboard*, el tercero se encarga de enviar a la tarjeta maestra el texto correspondiente a la práctica que se está realizando para su visualización en la pantalla. En la figura 41 se puede ver este flujo de datos.

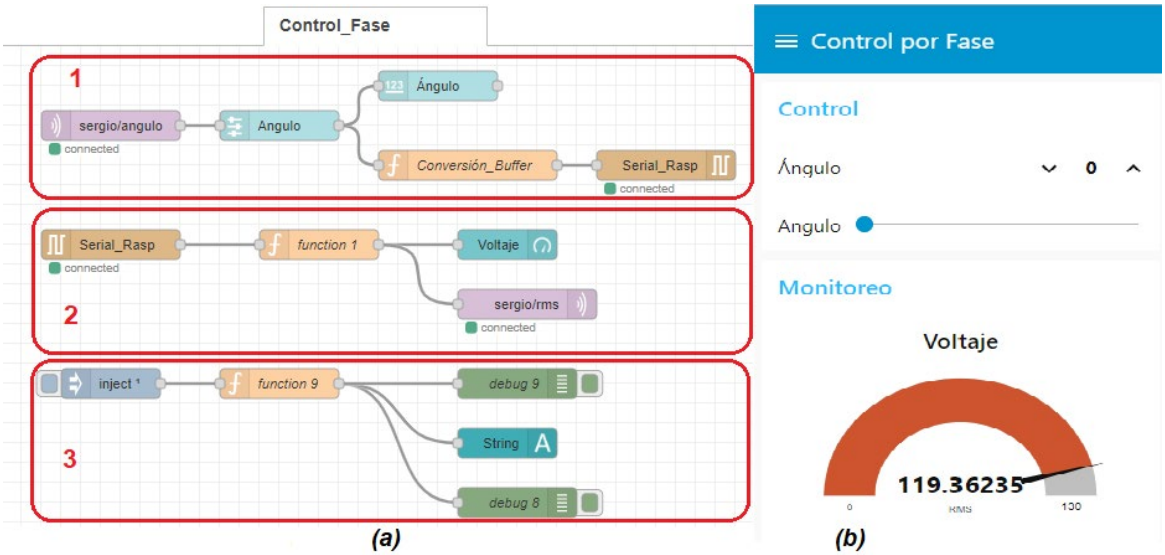


Figura 41. Flujo de trabajo para el módulo de control por fase (a) bloques de nodos, (b) dashboard.

Las funciones de los bloques dentro del flujo de trabajo que se muestran en la figura 38, encerradas con rectángulos rojos se listan a continuación:

1.Bloque de escritura ángulo de disparo: Este bloque se compone de un nodo de entrada MQTT, que recibe el valor del ángulo de disparo desde el *broker*, contiene también un *widget* tipo deslizador para ingresar el valor de manera local y uno numérico para su visualización, este valor se convierte en una trama serial para ser enviado a la tarjeta maestra.

2.Bloque de lectura de voltaje: Este bloque contiene de un nodo que recibe el valor de la medición desde la tarjeta maestra, escala, convierte el valor y lo lleva a un *widget* tipo manómetro para su visualización en el *dashboard,* además lleva el

dato a un nodo de escritura MQTT para ser enviado al Broker y permitir la visualización remota del valor de voltaje.

3.Bloque de visualización: Este bloque contiene un conjunto de nodos que generan y envían los textos correspondientes a la práctica realizada para ver en la pantalla de la tarjeta maestra.

Control de velocidad: Este flujo de trabajo contiene tres bloques: el primero se encarga de recibir el valor correspondiente al ciclo de dureza de la señal PWM desde la interfaz de usuario para enviarlo a la tarjeta maestra, el segundo bloque se encarga de recibir el valor de velocidad desde la tarjeta maestra para su visualización en el *dashboard*, el tercero se encarga de enviar a la tarjeta maestra el texto correspondiente a la práctica que se está realizando para su visualización en la pantalla. En la figura 42 se muestra este flujo de datos.

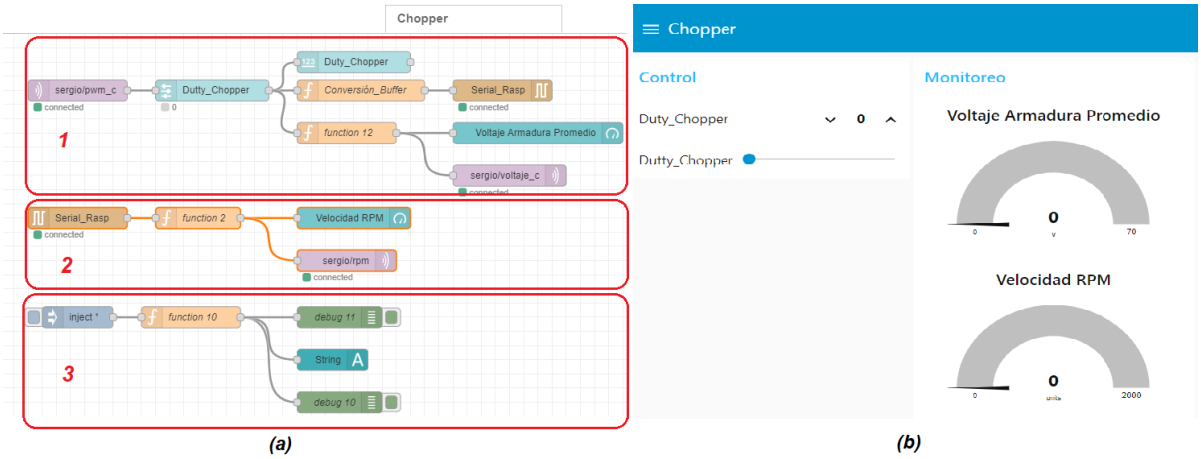


Figura 42. Flujo de trabajo para el módulo de control de velocidad (a) bloques de nodos, (b) dashboard.

Las funciones de los bloques dentro del flujo de trabajo que se muestran en la figura 39, encerradas con rectángulos rojos se listan a continuación:

1.Bloque de escritura PWM: Este bloque se compone de un nodo de entrada MQTT, que recibe el valor del ciclo de dureza desde el *broker*, contiene también un *widget* tipo deslizador para ingresar el valor de manera local, este valor se convierte en una trama serial para ser enviado a la tarjeta maestra.

2.Bloque de lectura de velocidad: Este bloque contiene de un nodo que recibe el valor de la medición desde la tarjeta maestra, corrige el valor y lleva a un *widget* tipo manómetro para su visualización en el *dashboard*, además lleva el dato a un nodo de escritura MQTT para ser enviado al *broker* y permitir la visualización remota del valor de velocidad. Contiene también un nodo de función que calcula el voltaje de armadura con la siguiente ecuación**:**

$$V_{OUT}: V_{IN} \text{x Ciclo de Dureza} \quad (3)$$

Este valor estimado, es llevado a un *widget* tipo manómetro para su visualización en el Dashboard.

3.Bloque de visualización: Este bloque contiene un conjunto de nodos que generan y envían los textos correspondientes a la práctica realizada para ver en la pantalla de la tarjeta maestra.

Convertidor DC-DC: Este flujo de trabajo contiene tres bloques: El primero se encarga de recibir el valor correspondiente al ciclo de dureza de la señal PWM y las señales de activación para las resistencias de carga desde la interfaz de usuario para enviarlo a la tarjeta maestra, el segundo se encarga de recibir los valores de voltaje y de corriente desde la tarjeta maestra para su visualización en el *dashboard*, el tercero se encarga de enviar a la tarjeta maestra el texto correspondiente a la práctica que se está realizando para su visualización en la pantalla

En la figura 43 se muestra este flujo de datos.

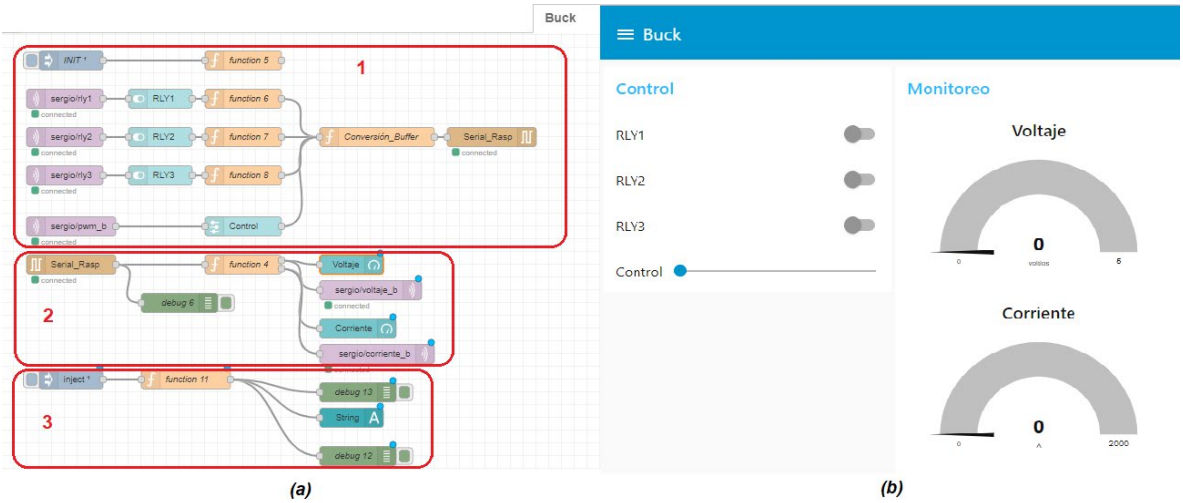


Figura 43. Flujo de trabajo para el módulo del convertidor DC-DC (a) bloques de nodos, (b) dashboard.

Las funciones de los bloques dentro del flujo de trabajo que se muestran en la figura 40, encerradas con rectángulos rojos se listan a continuación:

1.Bloque control de voltaje y carga: Este bloque se compone de 4 nodos de entrada MQTT, que reciben el valor del ciclo de dureza y las señales de activación

de las resistencias de carga desde el *broker*, contiene también 4 *widgets*, uno de tipo deslizador y otros tres de tipo suiche para realizar las mismas funciones de manera local; todos estos valores se convierten en una trama serial para ser enviado a la tarjeta maestra.

2.Bloque de lectura de voltaje y corriente: Este bloque contiene un nodo que recibe los valores de las medidas desde la tarjeta maestra, realiza las correcciones y escalamientos, los lleva a dos *widgets* de tipo manómetro para su visualización en el *dashboard*, además lleva el dato a dos nodos de escritura MQTT para ser enviados al *broker* y permitir la visualización remota de los valores de voltaje y corriente.

3.Bloque de visualización: Este bloque contiene un conjunto de nodos que generan y envían los textos correspondientes a la práctica realizada para ver en la pantalla de la tarjeta maestra.

3.1.4 Servicios en la nube:

Los servicios en la nube para el banco de pruebas, permiten la comunicación del usuario final con el servidor local, para esto se requirió un espacio en un servidor en la nube para alojar los servicios IoT, el *broker* MQTT y la interfaz Web. Esto permite una comunicación eficiente y la gestión adecuada de la información. La implementación de estos servicios se describe a continuación.

3.1.4.1 VPS

Los servicios remotos se implementaron en un servidor VPS (*Virtual Prívate Server*), adquirido por suscripción anual con una empresa de alojamiento web (Hostinger). Este servidor ofrece una IP fija pública, 50GB de almacenamiento en disco, 4GB de memoria RAM, un ancho de banda de 4TB (figura 44) compartidos entre todas conexiones entrantes/salientes, además brinda la posibilidad de seleccionar un sistema operativo con múltiples opciones a escoger, entre ellas, varias distribuciones de Windows Server y Linux. En este caso se optó por instalar Ubuntu 20.04, ya que esta versión brinda mayor estabilidad y compatibilidad con los servicios IoT de código abierto disponibles.

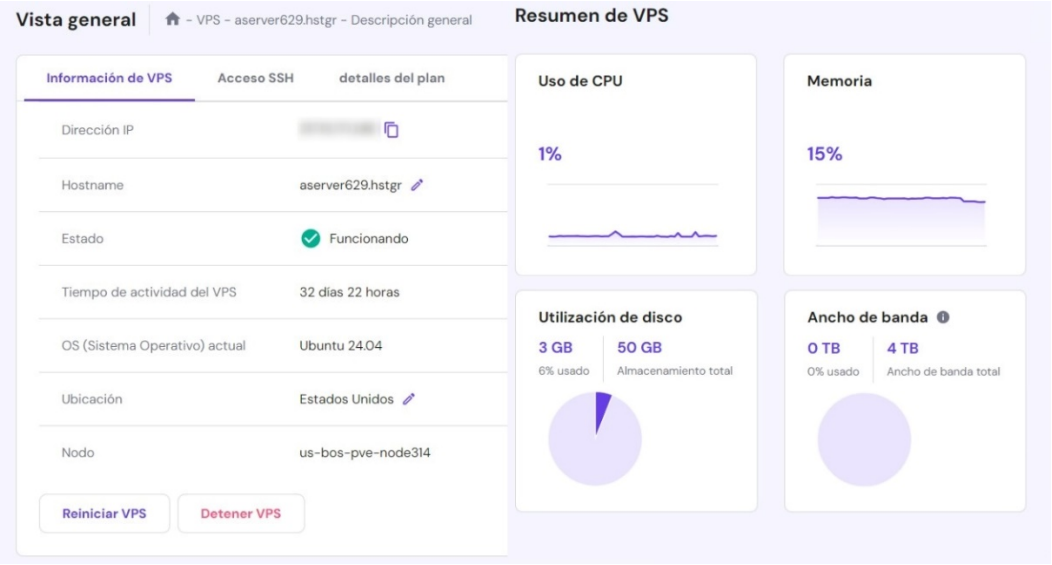


Figura 44. Características generales del VPS.

El acceso al servidor se hace mediante PuTTY [65] un software de código abierto que utiliza el protocolo SSH (*Secure Shell*) [66] para enviar datos de forma segura al equipo remoto. La interfaz de usuario se muestra en la figura 45.

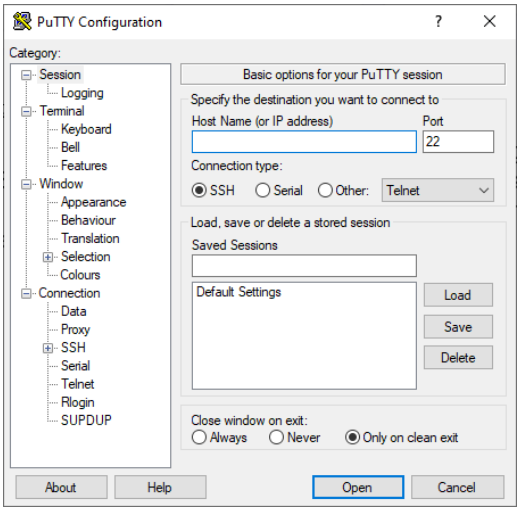


Figura 45. Interfaz de usuario PuTTY.

Después de la autenticación en el servidor remoto (figura 46), se tiene acceso a la consola de comandos del sistema operativo, esto permite la instalación del servicio Node-Red para la gestión y la visualización de la información y el servicio Mosquitto que funciona como intermediario entre el servidor local y el servidor remoto.

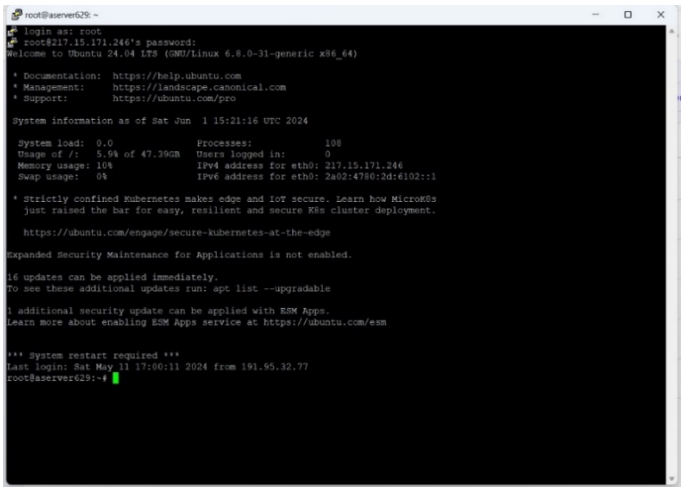


Figura 46. Consola de comandos en el servidor remoto.

3.1.4.2 *Broker* MQTT

El *broker* MQTT se implementó utilizando el servicio Mosquitto, que es una opción libre, ya que este permite una gran cantidad de conexiones simultáneas con una baja latencia, comparadas con servicios de suscripción que limitan tanto el número de conexiones como el número de mensajes enviados dependiendo del plan adquirido. En temas de seguridad se configuró el acceso por medio de un usuario y contraseña para garantizar la protección de la información en las conexiones.

En la figura 47 se muestra el esquema general de comunicación entre el servicio Node-Red (tanto local como remoto) con el *broker* MQTT mediante el modelo publicación/suscripción. Este modelo permite la suscripción a un tópico, cuando se produce un cambio, lo reciben los suscriptores y así se actualizan los valores tanto en el servidor remoto como en el local.

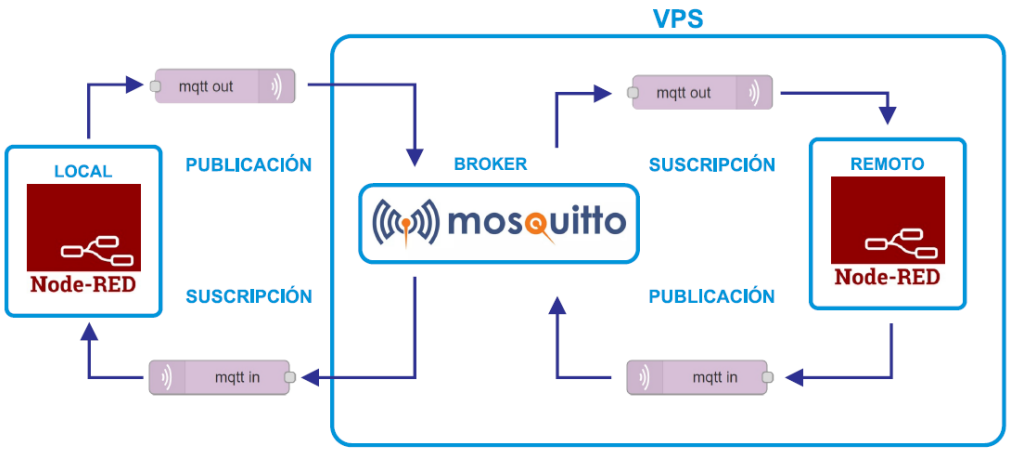


Figura 47. Esquema de conexión de los servicios local-remoto a través del broker MQTT.

3.1.4.3 Node-Red

Se instaló el servicio Node-Red en el servidor remoto, los flujos de trabajo en este caso son bastante sencillos ya que solo contienen nodos de lectura/escritura MQTT para transferencia de la información y *widgets* para la visualización y control en el *dashboard*, tal y como se puede apreciar en la figura 48.

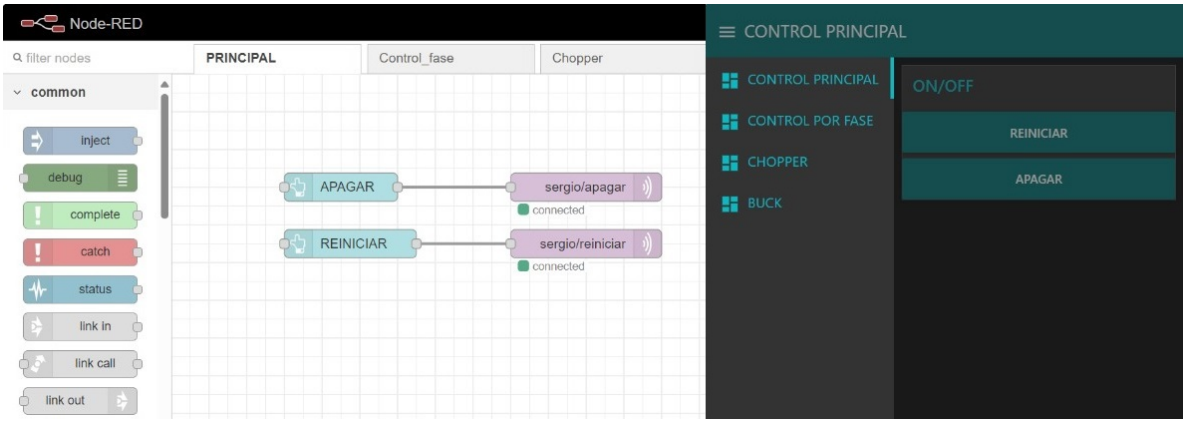


Figura 48. Flujo de trabajo y dashboard de Node-Red en el servidor remoto.

Configuración de los nodos MQTT en Node-Red

La configuración para la conexión de cada uno de los nodos MQTT de lectura/escritura, requiere el acceso a la ventana de propiedades (figura 49); se selecciona el icono del lápiz para editar las propiedades del nodo y en la pestaña ***Connection*** (figura 50), aparecen las siguientes opciones:

- Dirección del servidor (IP o Hostname)
- Puerto de comunicación: el puerto por defecto es el 1883, pero puede ser modificado según la necesidad.
- Versión del protocolo MQTT

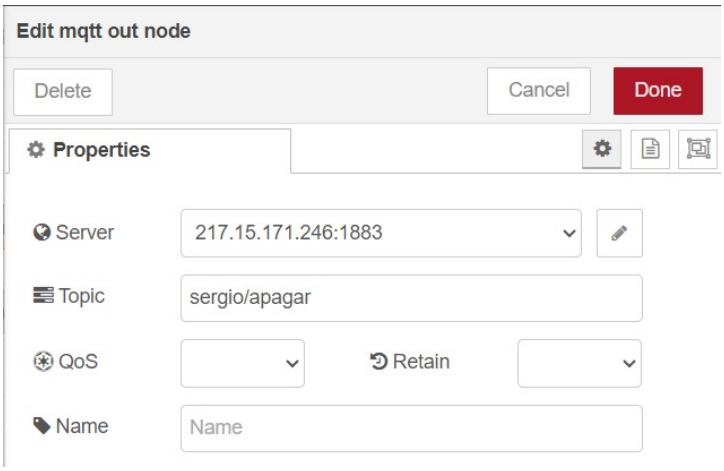


Figura 49. Ventana de propiedades del nodo MQTT.

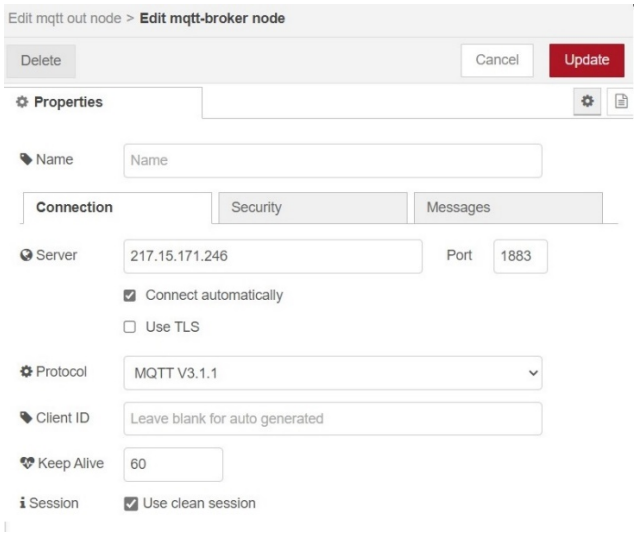


Figura 50. Pestañas de configuración de conexión del nodo MQTT.

En la pestaña ***Security*** (figura 51) se debe definir un usuario y contraseña para restringir el acceso. Una vez se termina el proceso de configuración, se vuelve a la ventana de propiedades y se define el tópico asociado al nodo para la comunicación. Para evitar conflictos en la comunicación, se utiliza una jerarquía en el nombre del tópico, definiendo en primer lugar el nombre de usuario seguido del nombre de la variable.

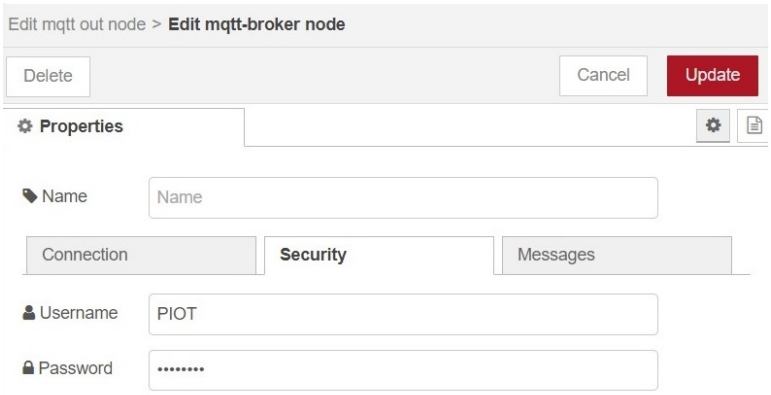


Figura 51. Pestaña de configuración de seguridad del nodo MQTT.

3.1.5 Interfaz web

La página web desarrollada se encarga de realizar el primer filtro para la realización de las prácticas. Dicha web fue creada usando JavaScript, es un lenguaje de programación de alto nivel y libre, específicamente la librería React, desarrollada para crear interfaces de usuario de manera eficiente y declarativa, además de una base de datos en MongoDB para los usuarios y el banco de preguntas descrito en los anexos.

Login del usuario

El acceso a la plataforma web requiere que todos los usuarios ingresen un nombre de usuario y una contraseña. La interfaz para el ingreso se muestra en la figura 52.

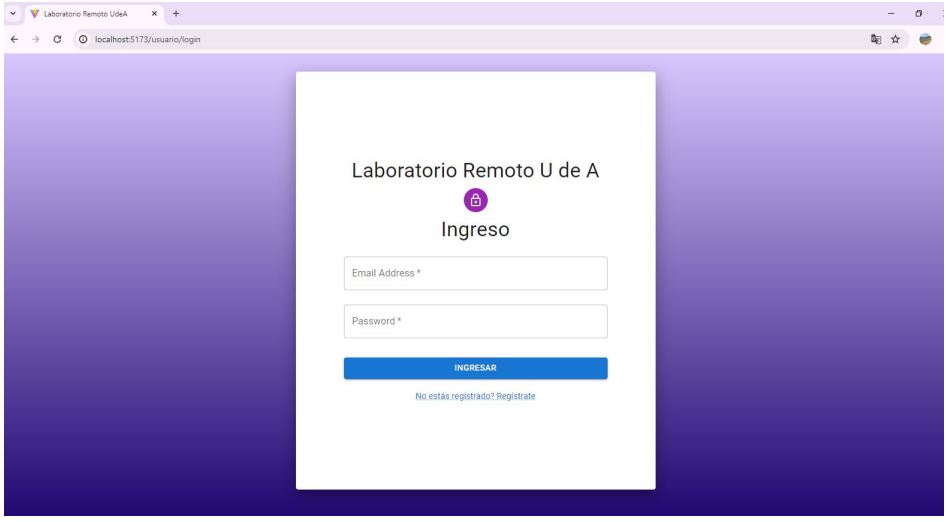


Figura 52. Interfaz para el ingreso a la web.

Se requiere que el usuario este registrado en la base de datos para poder ingresar a la plataforma. En caso de que no se encuentre registrado, en la parte inferior de la pantalla de ingreso aparece un enlace para ir a la página de registro y realizar el proceso.

Registro de usuarios

El proceso de registro requiere un nombre de usuario, una contraseña y un correo institucional para la validación del registro. La interfaz gráfica para el registro se visualiza en la figura 53.

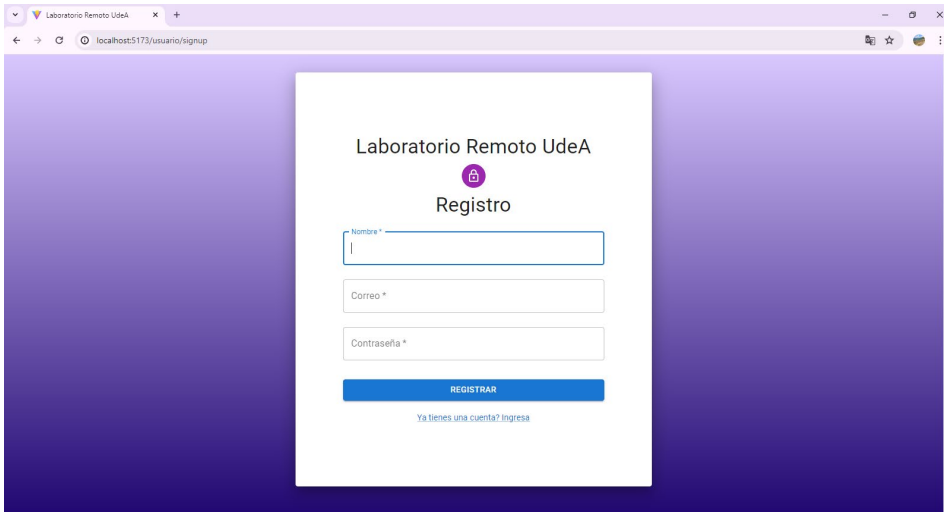


Figura 53. Interfaz para el registro de usuarios a la web.

Quiz

Una vez un usuario está registrado y ha logrado ingresar a la plataforma, podrá acceder al *quiz* del laboratorio que desea presentar. El banco de preguntas para dicho quiz está definido en los anexos.

Para las preguntas que se le hacen al usuario, la plataforma consulta en la base de datos las preguntas asociadas al tema del laboratorio a presentar, y selecciona 5 preguntas al azar; cuando una respuesta es seleccionada cambia de color, verde si es correcta, roja si es incorrecta. Estas preguntas cambian cada vez que se presenta por el usuario y en total se le permite presentarlo 3 veces seguidas. Un ejemplo del tipo de preguntas y el respectivo cuestionario se muestra en la figura 54.

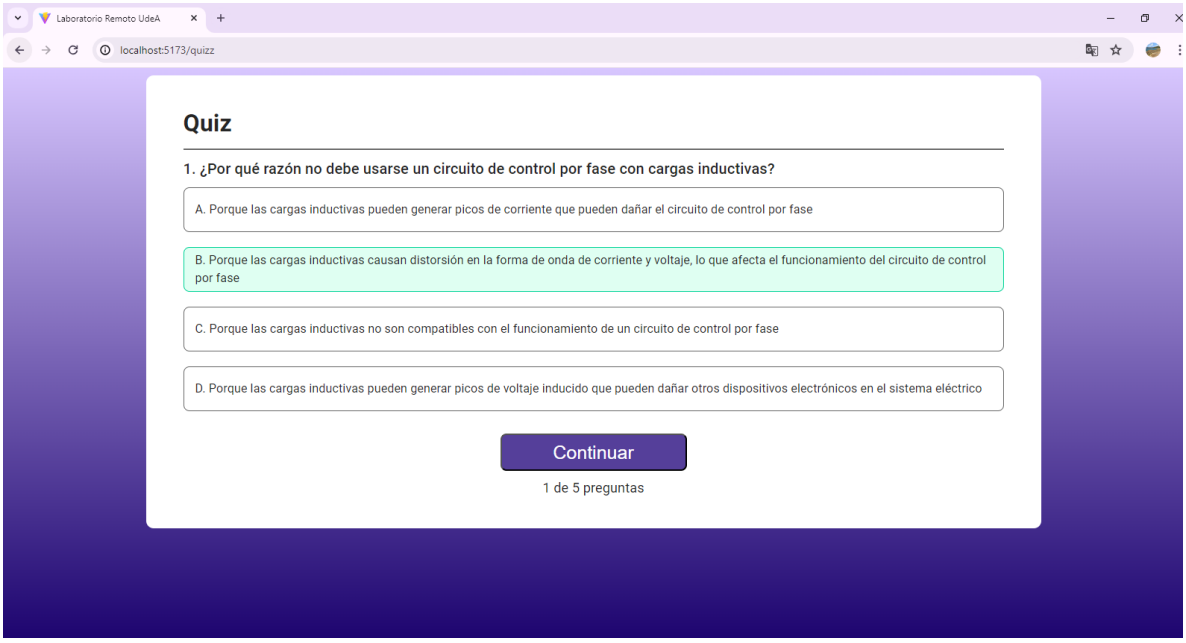


Figura 54. Diseño gráfico del quiz.

Una vez terminado el examen, y si el usuario no aprueba 4 de 5 preguntas como mínimo, podrá realizar dos intentos adicionales. La figura 52 muestra la opción de reintentar y el total de preguntas acertadas en el intento previo.

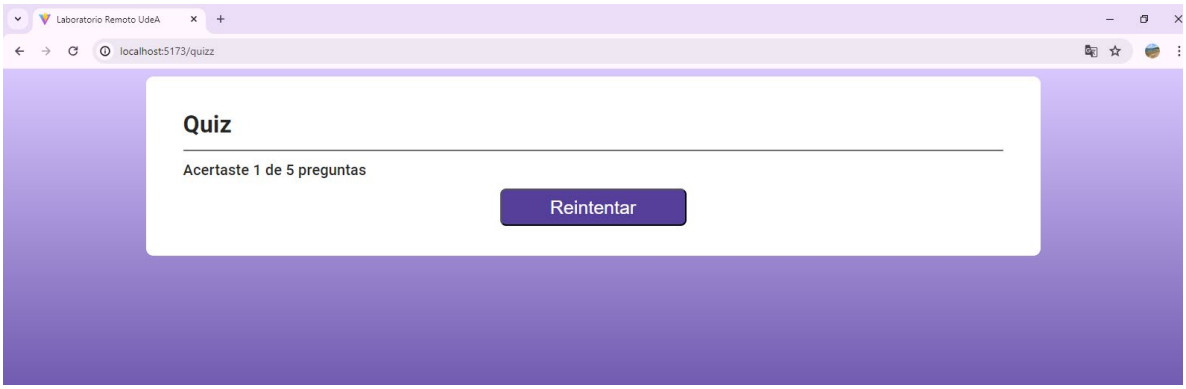


Figura 55. Opción para reintentar el quiz.

Si el usuario acierta 4 o más preguntas, se le habilitará el laboratorio. La figura 56 muestra cuantas preguntas se acertaron y un botón para redirigir al usuario al respectivo laboratorio.



Figura 56. Opción para ir a realizar la práctica.

Cuando el usuario selecciona la opción de ir al laboratorio, el navegador lo redirige al *dashboard* remoto, para realizar su práctica de laboratorio, como se ve en la figura 57.

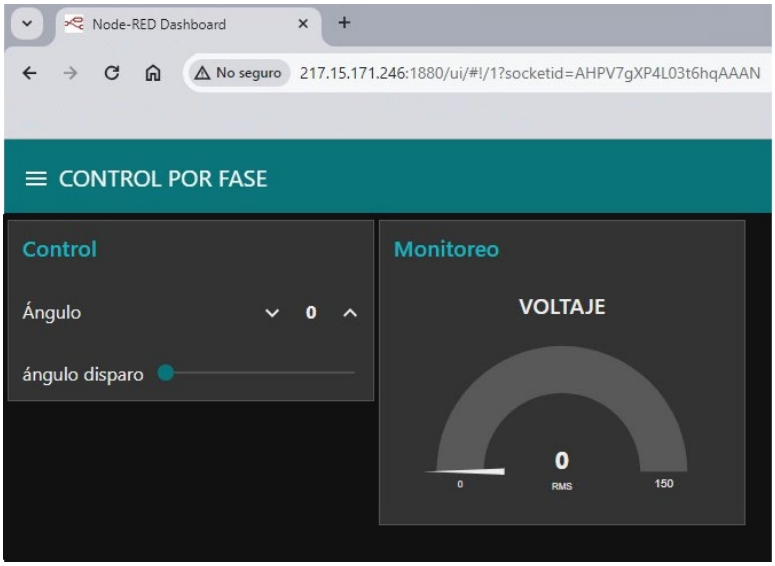


Figura 57. Dashboard Node-Red en el servidor remoto.

Base de datos MongoDB

Para la base de datos se seleccionó MongoDB por su facilidad de uso usando la denominada *MERN Stack*. En dicha base de datos, se deben guardar los datos como un esquema de datos.

La base de datos es no relacional y consta de una tabla de usuarios registrados y otra tabla con el banco de preguntas de los distintos temas de los laboratorios. La figura 58 muestra las colecciones o tablas que se implementaron para el proyecto.

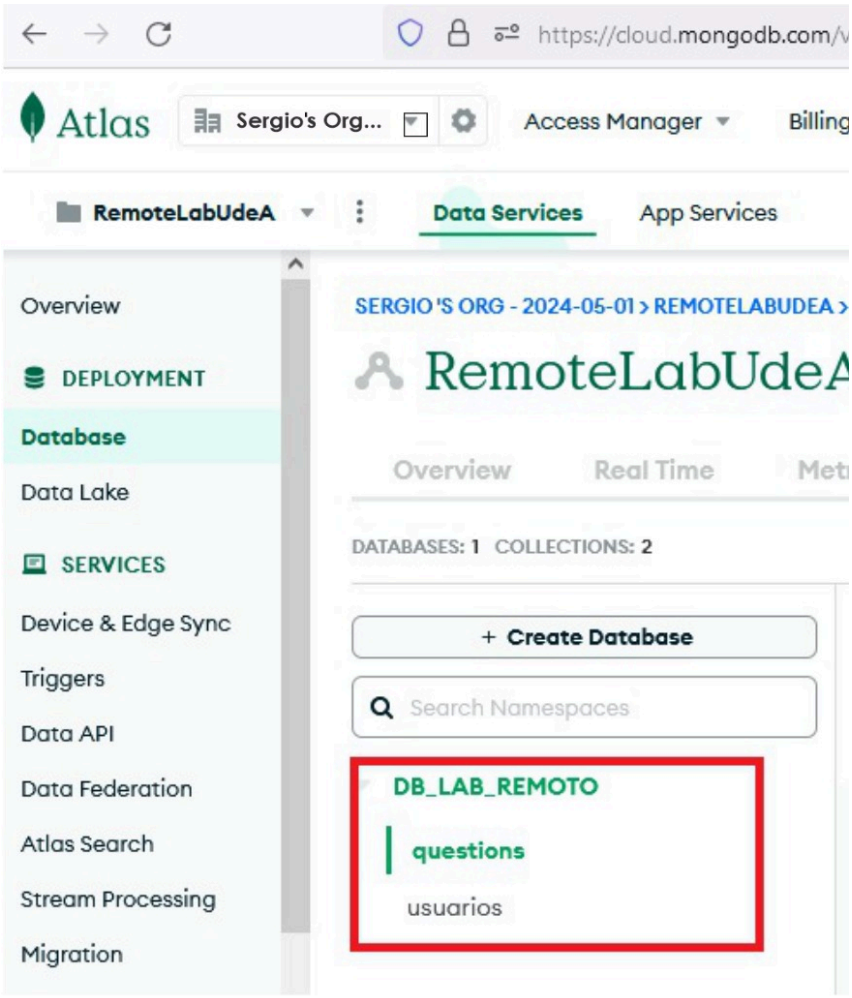


Figura 58. Base de datos para el laboratorio remoto.

En la figura 59, se muestra una pregunta del banco donde puede observar la pregunta, las opciones de respuesta, la opción correcta, el tema del laboratorio y las fechas de creación y actualización.

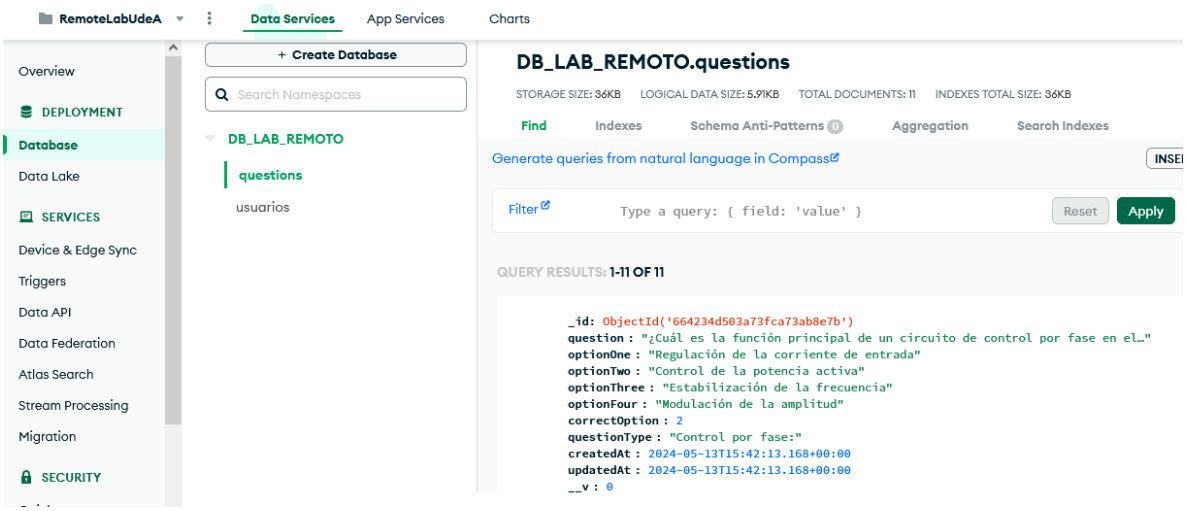


Figura 59. Esquema de preguntas en base de datos.

Para el caso de los usuarios se guardan el nombre, el email, el *password*, la cantidad de veces que se ha realizado cada *test o quiz*, la fecha de creación y la fecha de actualización como se observa en la figura 60.

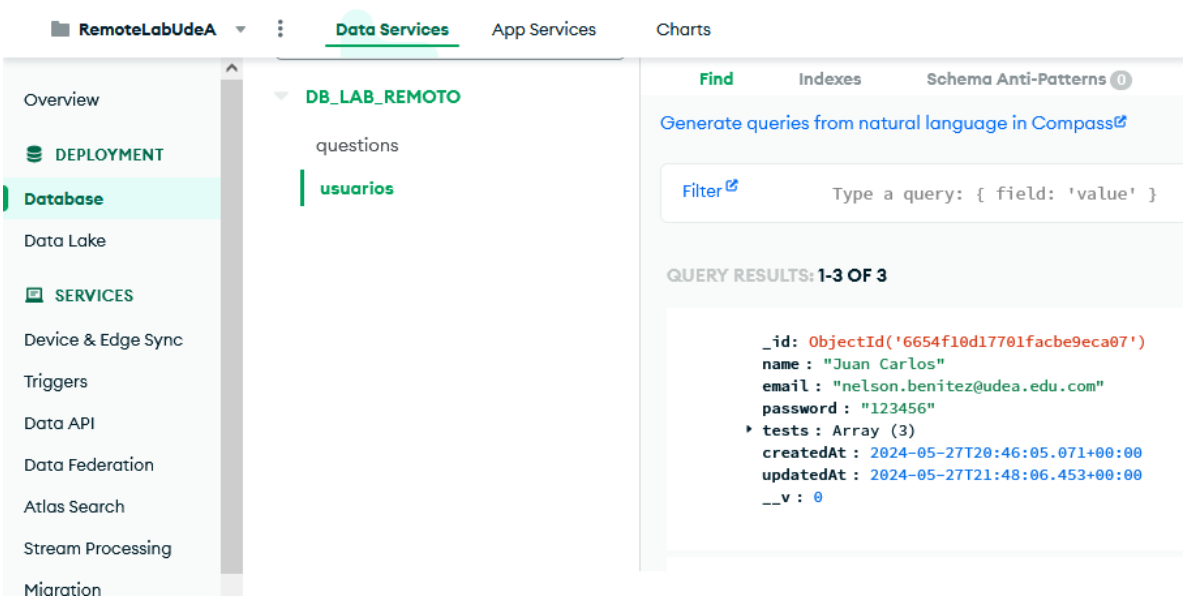


Figura 60. Esquema de usuario en base de datos.

Capítulo 4: Pruebas y ajustes

4.1 Calibración del módulo de control por fase

La verificación del correcto funcionamiento del módulo de control por fase requirió la calibración de las mediciones de voltaje en la carga, para esto se utilizó un multímetro FLUKE 115. La tabla 2 muestra las mediciones tomadas en varios ángulos de disparo con el módulo y el multímetro; muestra también el porcentaje de errores en la medida.

Tabla 2. Medidas de voltaje y porcentaje de error.

Medidas de voltaje			
Ángulo de disparo	**Voltaje RMS Dashboard**	**Voltaje RMS multímetro**	**Error (%)**
0	123.96	124.9	0.75
20	124.84	124.7	0.11
40	123.22	123.1	0.10
60	117.35	117.2	0.13
80	106.28	106.2	0.08
100	89.82	89.9	0.09
120	68.55	67.3	1.86
140	**43.8**	**44.9**	**2.45**
160	**17.7**	**22.8**	**22.37**
180	0	0	0

Se observa en la tabla 2 que en la mayoría de las medidas el porcentaje de error es muy bajo, mientras que en dos de las medidas (resaltadas en negrilla) es bastante alto. La corrección de la medida se hizo graficando en Excel las series de datos correspondientes a las dos medidas para agregar una línea de tendencia polinómica de segundo orden, y obtener una ecuación que brinde un factor de corrección, como se puede ver en la figura 61.

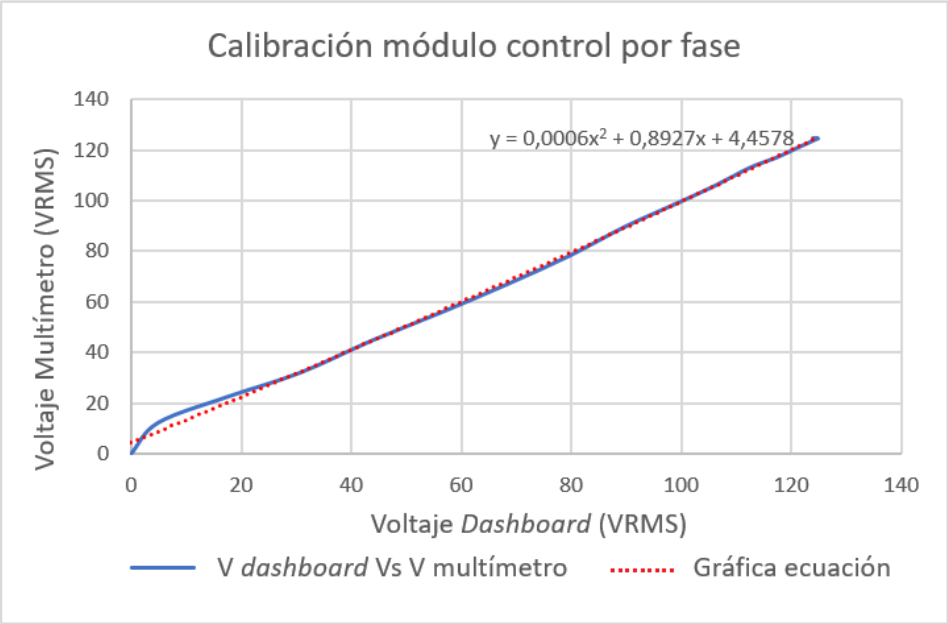


Figura 61. Voltaje dashboard vs voltaje multímetro para el módulo de control por fase.

De este proceso se obtiene la ecuación 4:

$$V_M: 0.0006V_D^2 + 0.8927V_D + 4.4578 \quad (4)$$

Donde:

V_M: Voltaje medido con el multímetro

V_D: Voltaje medido con el módulo.

Se introduce la ecuación de corrección del nodo correspondiente a la función en el programa en Node-Red para facilitar modificaciones adicionales en caso de ser necesario, ya que hacerlo en el microcontrolador requiere su reprogramación.

La figura 62 muestra el módulo completo con todos los elementos que lo componen.

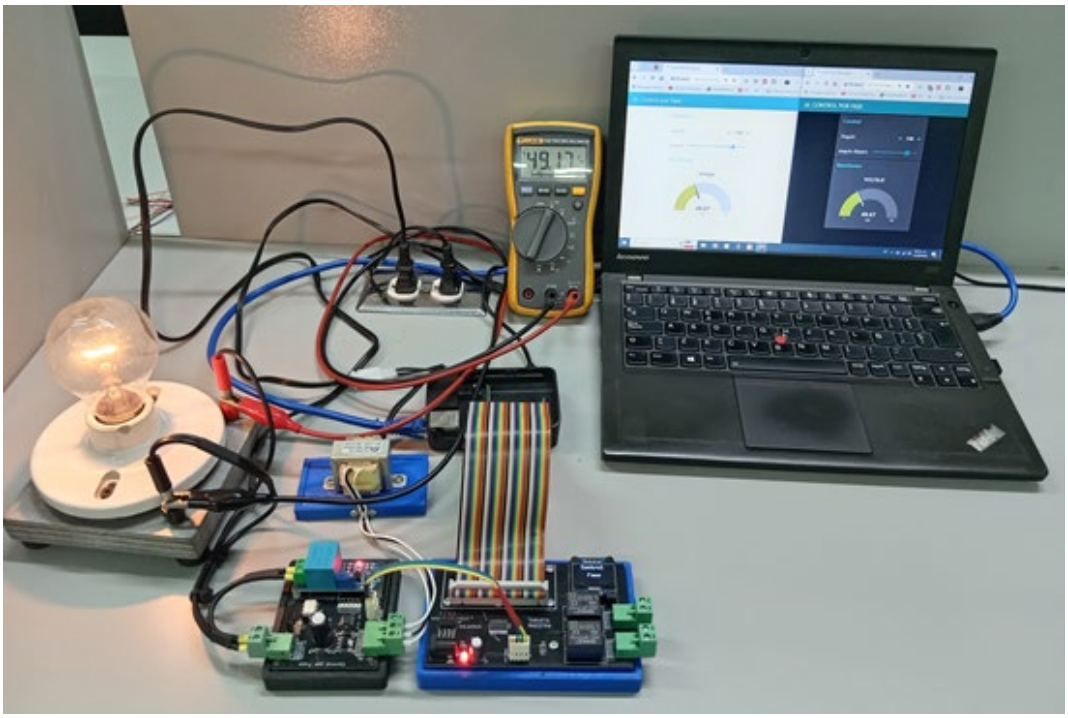


Figura 62. Módulo de control por fase.

Las mediciones realizadas después de aplicar la corrección se muestran en la tabla 3. Se puede ver que el error en la medición es aceptable y mucho más cercano al voltaje del multímetro.

Tabla 3. Medidas de voltaje y porcentaje de error después de aplicar la corrección.

Medidas de voltaje con ajuste			
Angulo de disparo	**Voltaje RMS Dashboard**	**Voltaje RMS multímetro**	**Error (%)**
0	125.42	124.9	0.42
20	125.34	124.7	0.51
40	123.65	123.1	0.45
60	117.56	117.1	0.39
80	106.2	106.1	0.09
100	89.57	89.7	0.14
120	68.56	68.2	0.53
140	44.8	44.7	0.22
160	20.53	21.6	4.95
180	0	0	0

4.2 Calibración del módulo de control de velocidad de un motor DC

Este módulo requirió la calibración de las mediciones de velocidad en el motor, para esto se utilizó un tacómetro rotativo SHIMPO DT-105A. La tabla 4 muestra las mediciones realizadas, además del porcentaje de errores en la medida. En la figura 63 se muestra una gráfica de las dos mediciones.

Tabla 4. Medidas de velocidad y porcentaje de error.

Medidas de velocidad			
Ciclo de dureza	**Velocidad Dashboard (RPM)**	**Velocidad Tacómetro (RPM)**	**Error (%)**
10	687.2	742	7.97
20	750.2	810	7.97
30	757.5	817	7.85
40	759.9	820	7.91
50	767.4	828	7.90
60	774.6	836	7.93
70	780.5	842	7.88
80	786.6	849	7.93
90	792.2	855	7.93
100	797.5	860	7.84

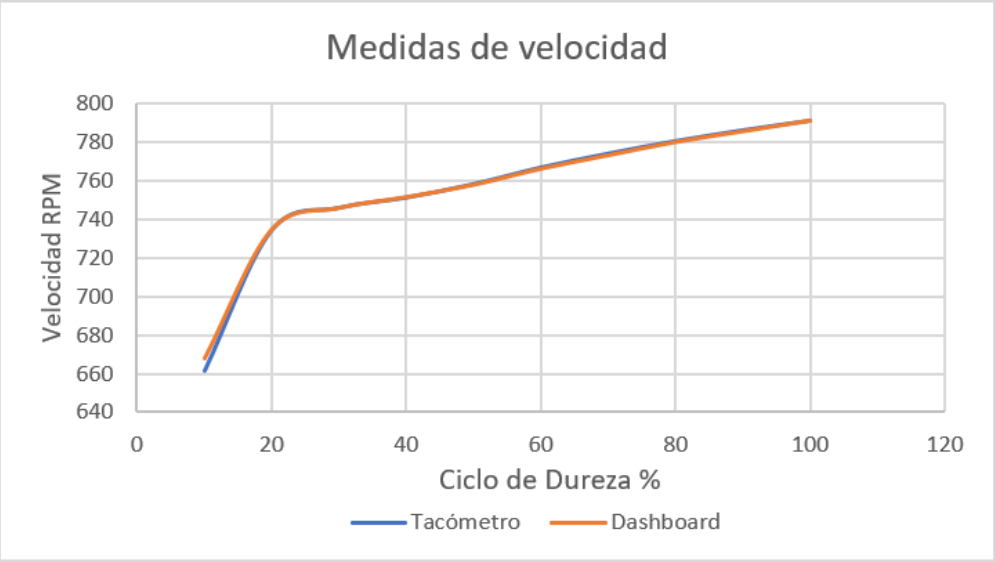


Figura 63. Grafica velocidad vs ciclo de dureza.

De la tabla 4 y la gráfica 63, se observa que el error en las mediciones es muy estable, no mayor a 7.9%. La calibración se realizó tomando como factor de corrección el valor promedio de los errores, el cual fue de 7.91%. Este valor de corrección se introdujo en el nodo de la función en el programa Node-Red, obteniendo como resultado las mediciones que se muestran a continuación en la tabla 5.

Tabla 5. Medidas de velocidad y porcentaje de error después de aplicar la corrección

Medidas de velocidad con ajuste			
Ciclo de dureza	**Velocidad Dashboard (RPM)**	**Velocidad Tacómetro (RPM)**	**Error (%)**
10	661.3	667.65	0.96
20	734.4	734.8	0.05
30	745.9	745.92	0.00
40	751.2	751.56	0.05
50	758.2	757.97	0.03
60	766.8	766.31	0.06
70	774	773.32	0.09
80	780.5	780.21	0.04
90	786.1	785.77	0.04
100	791.1	791.33	0.03

La figura 64 muestra el módulo completo con todos los elementos que lo componen.

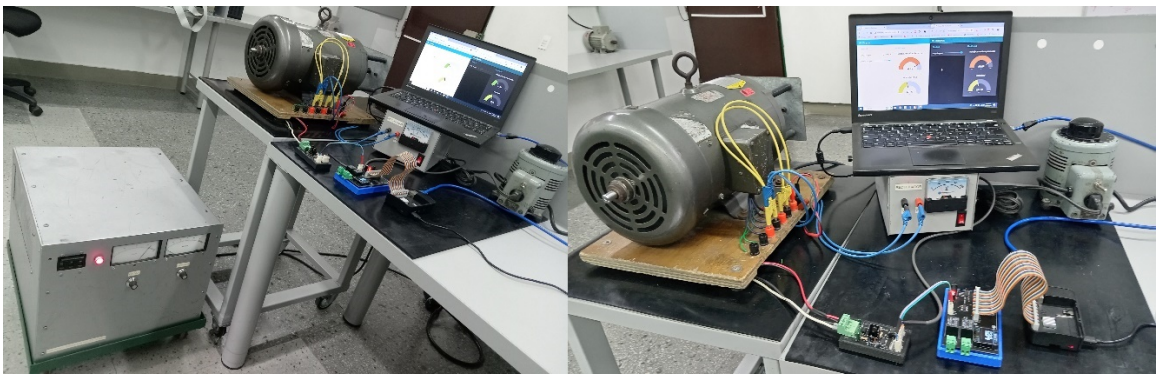


Figura 64. Módulo de control de velocidad de un motor DC.

4.3 Calibración del módulo convertidor DC-DC tipo *buck*

Este módulo realiza mediciones de voltaje y corriente de forma simultánea, para la calibración de las medidas se utilizaron dos multímetros FLUKE 115. La tabla 6 muestra las mediciones de voltaje correspondientes a distintos valores del PWM que controla el voltaje en módulo, además del porcentaje de error en la medida.

Tabla 6. Medidas de voltaje y porcentaje de error.

Medidas de voltaje			
Ciclo de dureza	**VDC Dashboard**	**VDC Multímetro**	**Error (%)**
10	0.96	0.88	9.09
20	1.93	1.77	9.04
30	2.94	2.74	7.30
40	3.91	3.71	5.39
50	4.92	4.75	3.58
60	5.88	5.77	1.91
70	6.93	6.96	0.43
80	7.86	8.12	3.20
90	8.91	9.4	5.21
100	9.88	10.2	3.14

Se observa en la tabla 6 que el porcentaje de error en las medidas es bajo, pero no constante, la corrección de la medida se hizo graficando en Excel las series de datos correspondientes a las dos medidas para realizar una regresión y obtener una ecuación que brinde un factor de corrección, como se puede ver en la figura 65.

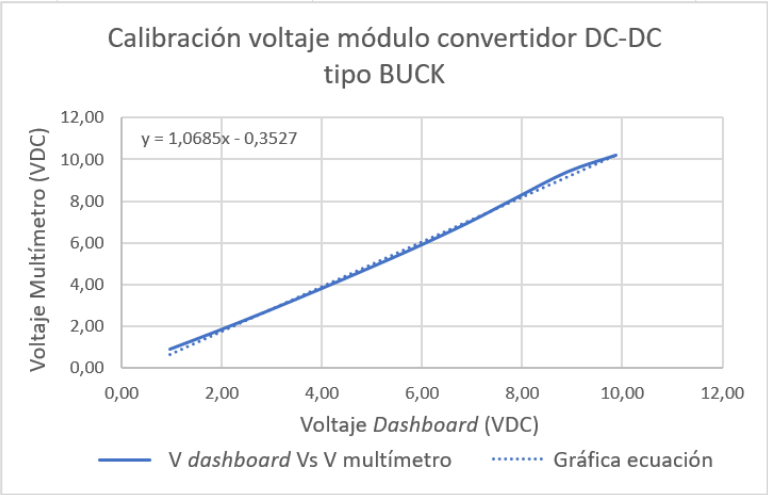


Figura 65. Voltaje dashboard vs voltaje multímetro para el módulo convertidor DC-DC tipo buck

De este proceso se obtiene la ecuación 5:

$$V_M: 1.0685V_D - 0.3527 \quad (5)$$

Donde:

V_M: Voltaje medido con el multímetro

V_D: Voltaje medido con el módulo.

Se introduce la ecuación de corrección el nodo correspondiente a la función, en el programa en Node-Red, a continuación, en la tabla 7 se muestran las medidas realizadas después de la calibración.

Tabla 7. Medidas de voltaje y porcentaje de error después de aplicar la corrección

Medidas de voltaje con ajuste			
Ciclo de dureza	**VDC Dashboard**	**VDC Multímetro**	**Error (%)**
10	0.88	0.9	2.22
20	1.8	1.87	3.74
30	2.79	2.81	0.71
40	3.82	3.77	1.33
50	4.8	4.78	0.42
60	5.93	5.85	1.37
70	7.01	6.89	1.74
80	8.08	8.06	0.25
90	9.16	9.2	0,43
100	10.19	10.34	1.45

De la tabla 7 se observa la reducción del error en la medida, después de aplicar la corrección.

El proceso de calibración de la medida de la corriente en el módulo, requirió la toma de medidas, como lo muestra la tabla 8.

Tabla 8. Medidas de corriente y porcentaje de error.

Medidas de corriente			
Ciclo de dureza	**IDC Dashboard**	**IDC Multímetro**	**Error (%)**
10	**0.08**	**0.131**	**38.93**
20	**0.17**	**0.194**	**12.37**
30	0.26	0.275	5.45
40	0.34	0.35	2.86
50	0.44	0.438	0.46
60	0.52	0.526	1.14
70	0.62	0.623	0.48
80	0.7	0.736	4.89
90	**0.79**	**0.883**	**10.53**
100	**0.88**	**1.03**	**14.56**

De la tabla 8 se observa que hay seis valores que tienen un valor de error aceptable, pero los 4 restantes (resaltados en negrilla) presentan un error bastante alto, La corrección de la medida se hizo graficando en Excel las series de datos correspondientes a las dos medidas para agregar una línea de tendencia polinómica de segundo orden, y obtener una ecuación que brinde un factor de corrección, como se puede ver en la figura 66.

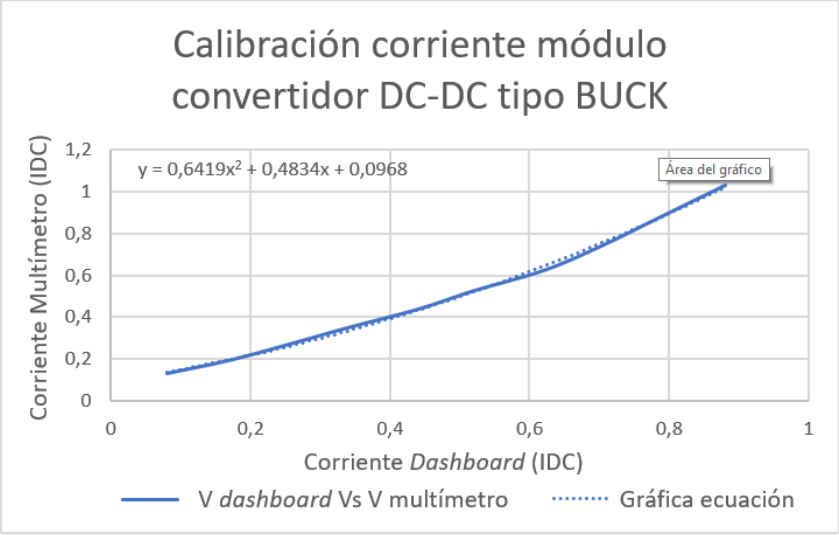


Figura 66. Corriente dashboard vs corriente multímetro para el módulo convertidor DC-DC tipo buck.

De este proceso se obtiene la ecuación 6:

$$I_M: 0.6419I_D^2 + 0.4834I_D + 0.0968 \quad (6)$$

Donde:

I_M: Corriente medida con el multímetro

I: Corriente medida con el módulo.

Se introduce la ecuación de corrección el nodo correspondiente a la función, en el programa en Node-Red, a continuación, en la tabla 9 se muestran las medidas realizadas después de la calibración.

Tabla 9. Medidas de Corriente y porcentaje de error después de aplicar la corrección

Medidas de corriente con ajuste			
Ciclo de dureza	**IDC Dashboard**	**IDC Multímetro**	**Error (%)**
10	0,146	0,135	8,15
20	0,2	0,195	2,56
30	0,269	0,271	0,74
40	0,345	0,349	1,15
50	0,434	0,435	0,23
60	0,538	0,535	0,56
70	0,64	0,622	2,89
80	0,755	0,726	3,99
90	0,89	0,868	2,53
100	1,026	1,01	1,58

De la tabla 9 se observa una disminución favorable en error en las mediciones, en la figura 67 se muestra el módulo completo con todos los elementos que lo componen.

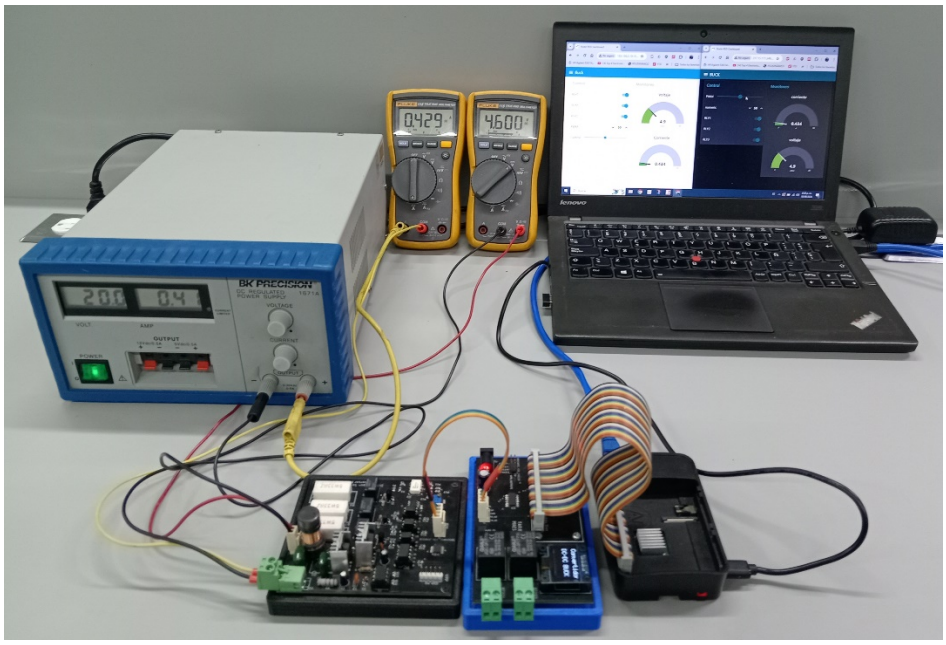


Figura 67. Módulo convertidor DC- DC tipo Buck.

4.4 Discusión de resultados

En la tabla 10, se presenta el resumen de costos totales del proyecto, donde se muestra en cifras los valores de los componentes del sistema; cabe aclarar que no se incluyeron los valores de elementos como el motor con *encoder*, las fuentes, el *variac,* ni el rectificador; por ser estos elementos existentes en el laboratorio donde se utilizó el banco de pruebas remoto como un elemento integrador de estos equipos, con la finalidad de extender su uso en prácticas de laboratorio no presenciales.

Tabla 10. Costos del banco de pruebas remoto

Costos totales Banco de pruebas remoto	
Elemento	**Costo**
Circuitos Impresos	$ 17 USD
Componentes electrónicos	$ 68 USD
Servicio de alojamiento en Hostinger	$ 75 USD
Raspberry Pi 4	$ 51 USD
	Total: $ 211 USD

En la tabla 11 se presenta un cuadro comparativo entre el sistema implementado (banco de pruebas remoto) y los sistemas más relevantes del mercado. En este

análisis, se examinan sus ventajas y desventajas en aspectos clave como: modularidad, escalabilidad, operación remota, licencias de software y costos.

Tabla 11. Cuadro comparativo entre los sistemas para laboratorios remotos

Característica	NI ELVIS	Analog Discovery Board	FACET	Banco de pruebas remoto
Ventajas	Posee instrumentos de medición integrados, modularidad, escalabilidad y está orientado al uso en laboratorios educativos, hace uso del software (LabVIEW).	Es portátil y de bajo costo, posee múltiples herramientas en un solo dispositivo (osciloscopio, generador de señales, etc.), además de integración con el software WaveForms.	Posee una interfaz visual y práctica para enseñanza, sus componentes son modulares e intercambiables. Está diseñado específicamente para ámbitos educativos, además permite prácticas de laboratorio interactivas	Posee una interfaz de registro y autenticación, brinda la posibilidad de realizar una evaluación previa de conocimientos antes de cada práctica, es modular y escalable, la interfaz es sencilla y amigable con el usuario, puede utilizarse desde equipos de cómputo o móviles sin instalar ningún tipo de software.
Desventajas	Es un sistema de alto costo comparado con otras opciones, requiere de una configuración más elaborada y espacio físico considerable, además depende mucho del software de NI (licencias).	Es limitado en capacidad para proyectos complejos o avanzados, su precisión es baja comparada con equipos de laboratorio más profesionales, no se recomienda para ambientes industriales o de investigación avanzada.	Es poco flexible para proyectos fuera del ámbito educativo, no es muy versátil para investigación o aplicaciones profesionales, además es un sistema costoso comparado con otras opciones para enseñanza.	Requiere elementos externos existentes en los laboratorios, tales como fuentes y motores de tipo industrial, la integración de nuevos módulos requiere su diseño y fabricación, además de la modificación de los programas en Node-red.
Software	LabVIEW, Multisim (requiere licencias).	WaveForms (gratuito).	Propio de FACET (licencias propietarias).	Utiliza software de código abierto (Linux, Node-Red, JavaScript).
Escalabilidad	Alta, permite la conexión de módulos adicionales, que deben ser adquiridos por separado	Media, el hardware del dispositivo tiene módulos de práctica limitados, permite expansiones a través de montajes realizados por el usuario.	Media (limitado a los módulos de enseñanza).	Alta, permite la integración de nuevos módulos de práctica con modificaciones sencillas.
Operación remota	Brinda soporte completo para operación remota mediante el uso de LabVIEW y servidores de red.	Brinda Soporte básico para operación remota, puede controlarse a través de una computadora conectada mediante USB, pero no tiene funcionalidades nativas para operación a larga distancia, requiere configuraciones adicionales para lograr acceso remoto limitado.	Su capacidad de operación remota es limitada, ya que orientada más a entornos presenciales de enseñanza y no cuenta con soporte directo para operación remota avanzada.	Permite operación remota a través del IoT utilizando protocolos MQTT, optimizados para el bajo consumo de datos, para usuarios con limitaciones de ancho de banda. Permite también la operación local.

Costos	Entre $2,500 y $4,000 USD (con software y módulos adicionales).	Entre $250 y $400 USD (básico, sin accesorios adicionales).	Entre $3,000 y $5,000 USD (dependiendo de los módulos).	$211 USD

Al analizar los resultados comparativos presentados en las tablas anteriores, se evidencia que el sistema implementado ofrece ventajas significativas frente a los sistemas comerciales evaluados. Entre sus principales fortalezas se destacan una mayor flexibilidad para la integración de componentes existentes, la optimización para la operación remota con bajo consumo de datos mediante el uso de protocolos IoT, específicamente MQTT, y una escalabilidad que permite incorporar nuevos módulos con facilidad, realizando solo ajustes mínimos al sistema actual. Además, su diseño basado en software de código libre facilita la adaptación a otros cursos de manera rápida y sencilla.

En cuanto a los costos, la tabla 11 muestra que la implementación del sistema es significativamente más económica en comparación con sus equivalentes comerciales, ya que no requiere licencias de software y permite una reducción adicional al aprovechar el espacio en los servidores de las instituciones. Además, el sistema cuenta con una plataforma de registro y acceso que incluye una base de datos para almacenar el banco de preguntas utilizado en la evaluación de conocimientos previos, necesaria para habilitar la realización de las prácticas, así como los datos de los usuarios. Estas son características que no se encuentran en ninguna de las plataformas evaluadas.

En términos de innovación, el proyecto también promueve un ambiente de aprendizaje seguro, ya que los estudiantes no están expuestos directamente a los riesgos asociados con la manipulación de dispositivos de alta potencia, y esto contribuye a una mayor accesibilidad a las prácticas por parte de los estudiantes.

4.5 Rendimiento del sistema

El rendimiento del sistema fue evaluado en términos de estabilidad y tiempos de respuesta, tomando como referencia las capacidades de los componentes utilizados y las especificaciones técnicas de las herramientas implementadas. Con la arquitectura de la plataforma (que incluye un servidor local implementado en una Raspberry Pi, utilizando Node-Red y MQTT), se estima que la latencia promedio entre la interacción del usuario en la plataforma web y la respuesta de los dispositivos físicos se encuentra en el rango de 150 a 250 milisegundos. Esta estimación se basa en las características de transmisión de datos de los

protocolos MQTT y en la capacidad de la Raspberry Pi para gestionar múltiples conexiones simultáneas

Estos tiempos de latencia son adecuados para las prácticas de electrónica de potencia, donde los cambios en los parámetros no requieren una respuesta en tiempo real inmediata, y permiten una observación detallada de los efectos en las cargas en un entorno educativo.

La precisión en la medición de variables como voltaje y corriente se estima dentro de un rango aceptable para propósitos educativos, con una variación de aproximadamente 2% en comparación con instrumentos comerciales. Estos resultados estimados son coherentes con el tipo de hardware y software utilizados en el proyecto, y se espera que el sistema proporcione un entorno de aprendizaje estable y seguro para los estudiantes.

Además, el sistema ha demostrado ser escalable en pruebas preliminares, lo que permite gestionar múltiples conexiones simultáneas sin comprometer la experiencia del usuario. Esto refuerza la capacidad del sistema para ser implementado en laboratorios educativos con varios estudiantes accediendo a los módulos de manera concurrente.

5. Conclusiones

En este trabajo de maestría se presenta el desarrollo de un sistema de control remoto de bajo costo para la realización de prácticas de electrónica de potencia utilizando una plataforma web en código abierto que controla los módulos de práctica y la adquisición de datos.

- Este proyecto de investigación ha implementado exitosamente un banco de pruebas remoto para prácticas en electrónica de potencia, utilizando tecnologías basadas en el Internet de las Cosas (IoT) y componentes de bajo costo. El sistema permite a los estudiantes realizar prácticas de forma remota, lo que representa un avance significativo en términos de accesibilidad y reducción de riesgos asociados a la manipulación de equipos de alta potencia.
- La plataforma, desarrollada en software de código abierto y alojada en la nube, permite el control remoto de los módulos de prácticas de electrónica de potencia. Incluye una página web que facilita el registro y acceso seguro de los estudiantes, además de una evaluación previa que asegura su preparación. La base de datos integrada gestiona eficientemente la información de usuarios y el banco de preguntas, optimizando el control académico y mejorando la experiencia de aprendizaje a distancia.
- El diseño del banco de pruebas es flexible y escalable, lo que facilita la incorporación de nuevos módulos de práctica en el futuro. Esta capacidad de expansión asegura que el sistema pueda adaptarse a las necesidades cambiantes de los cursos de electrónica de potencia y áreas relacionadas, siendo una herramienta valiosa para los programas de educación en ingeniería.
- La evaluación preliminar del rendimiento del sistema, basada en estimaciones, sugiere que los tiempos de respuesta están en un rango adecuado (150 a 250 milisegundos) para el contexto educativo. Esto asegura una interacción fluida entre los usuarios y los dispositivos físicos, proporcionando un entorno de aprendizaje efectivo y seguro. Asimismo, la precisión en la medición de variables, como voltaje y corriente, se estima dentro de un rango aceptable para fines educativos, lo que refuerza la viabilidad del sistema para su uso en prácticas de laboratorio.
- En términos de innovación, el banco de pruebas propuesto no solo amplía la cobertura educativa para estudiantes que no pueden acceder físicamente al laboratorio, sino que también reduce significativamente los costos operativos en comparación con los laboratorios tradicionales. Además, al utilizar tecnologías de código abierto, el sistema garantiza una mayor flexibilidad y accesibilidad para su implementación en otras instituciones educativas.

- Este trabajo ha alcanzado los objetivos establecidos, proporcionando una herramienta educativa robusta, flexible y de bajo costo que puede ser utilizada

para mejorar las prácticas en electrónica de potencia en diversas instituciones. Las contribuciones de este proyecto son tanto tecnológicas como educativas, y abren nuevas oportunidades para la enseñanza remota en el ámbito de la ingeniería.

6. Trabajos futuros

- Desarrollar módulos de práctica adicionales en el área de electrónica de potencia: convertidor DC-DC tipo *boost*, inversor de polaridad, rectificador monofásico semicontrolado, rectificador trifásico semicontrolado.
- Migrar el sistema al curso de acondicionamiento de señales, con módulos de práctica para medir variables tales como: temperatura, peso, velocidad, corriente AC y DC, aceleración, humedad relativa, caudal y presión.
- Implementar una guía didáctica en la interfaz de usuario para la realización de las prácticas.
- Incrementar el banco de preguntas en la base de datos.
- Crear una base de datos integrada a las plataformas LMS (*Learning Management System*) existentes para llevar un historial del proceso educativo y el avance de los estudiantes en el curso.

7. Anexos

7.1 Código de programación microcontroladores

7.1.1 Tarjeta del módulo de control por fase

```
#include <12f1822.h>
#fuses intrc_io,noprotect,nomclr,nowdt
#use delay(clock=8M)
#use rs232(baud=9600,xmit=pin_a0,rcv=pin_a1,uart1)

#include <math.h>
#define vp 169.7

int dato=0;
int1 s=0;
float ang_rad=0;
float vrms=0;

#int_rda
void serial(){
  dato=getc();
  putc(dato);
 s=1;
}

#int_comp
void comparador(){
 //putc(get_timer0());
 set_timer0(0);
}

void main(){
setup_adc(adc_clock_internal);
setup_adc_ports(sAn2);
set_adc_channel(2);
enable_interrupts(global);
enable_interrupts(int_rda);
setup_comparator(CP1_A4_DAC|CP1_INT_L2H);
setup_dac(DAC_VSS_VDD);
enable_interrupts(int_comp);
dac_write(5);
setup_timer_0(T0_internal|T0_div_128);

 for(;;){

  if(s){
    s=0;
    dato=100-dato;
    dato=(int)((float)(dato)*1.3);
  }
```

```
  //Ecuación para determinar el valor RMS

  vrms=sqrt((PI-ang_rad)+0.5*sin(2*ang_rad));
  printf("%3.2f\n",vrms);

  if(((dato<get_timer0())&&(get_timer0()<dato+10))||dato==0){
      output_high(pin_a5);
     }
     else {
      output_low(pin_a5);
     }
  }
}
```

7.1.2 Tarjeta del módulo de control de velocidad de un motor DC

```
#include <18f06q40.h>
#fuses nomclr,noprotect,nowdt
#use delay(internal=8M)
//#use timer(timer=0,tick=1ms)

int pwm=0;
int16 voltage=0;
int1 t=0;

// Declaración de pines serial
#pin_select U1TX=pin_c0
#pin_select U1RX=pin_c1
#use RS232(baud=9600,uart1)

// Declaración salida PWM
#pin_select CCP1OUT=pin_a5

//Declaración entrada timer 1
#pin_select T1CK=pin_a2


#int_rda
void serial_1(){
   pwm=getc(); // Se captura el dato que proviene de la tarjeta de control

}

#int_timer0
void timer_0(){
   printf("%lu\n",get_timer1());
   set_timer1(0);
   t=1;
}

#int_adc
void read_voltage(){
```

```
  voltage=read_adc();
}

void main(){
  port_a_pullups(0xff);
  enable_interrupts(global);
  enable_interrupts(int_rda);
  enable_interrupts(int_timer0);
  setup_ccp1(CCP_PWM);
  setup_timer_2(T2_DIV_BY_1|T2_CLK_INTERNAL,255,1);
  setup_timer_1(T1_EXTERNAL|T1_DIV_BY_8);
  setup_timer_0(T0_internal|T0_16_BIT|T0_DIV_8);
  set_pwm1_duty(0);
  for(;;){
    set_pwm1_duty(pwm);
    if(t){
      t=0;
      printf("%lu\n",voltage);
    }

 }

}
```

7.1.3 Tarjeta del módulo convertidor DC-DC tipo BUCK

```
#include <18f06q40.h>
#device adc=12;
#fuses nomclr,noprotect,nowdt
#use delay(internal=8M)
//#use timer(timer=0,tick=1ms)


#define RLY1 pin_c2
#define RLY2 pin_c1
#define RLY3 pin_c0


int pwm=0;
int i=0;
int sec=0;
int dato=0;
int16 voltaje_adc=0;
int16 corriente_adc=0;
int32 suma=0;
int1 c=0;

// Declaración de pines serial
#pin_select U1TX=pin_a4
#pin_select U1RX=pin_a5
#use RS232(baud=9600,uart1)
```

```
// Declaración salida PWM
#pin_select CCP1OUT=pin_c5


#int_timer1
void tiempo(){
  c=1;
}

#int_rda
void serial_1(){
  dato=getc(); // Se captura el dato que proviene de la tarjeta de control
  switch(sec){
    case 0:
      if(dato==240){
        sec++;
      }
    break;
    case 1:
      if(dato==20){
        sec++;
      }
      else{
        sec=0;
      }
    break;
    case 2:
      pwm=dato;
      sec++;
    break;
    case 3:
      output_bit(RLY1,(int1)dato);
      sec++;
    break;
    case 4:
      output_bit(RLY2,(int1)dato);
      sec++;
    break;
    case 5:
      output_bit(RLY3,(int1)dato);
      sec=0;
    break;
  }

}


void main(){
  port_a_pullups(0xff);
  setup_adc(adc_clock_internal);
  setup_adc_ports(sAN2|sAN20);
  set_adc_channel(2);
  enable_interrupts(global);
  enable_interrupts(int_rda);
  enable_interrupts(int_timer1);
```

```
  setup_ccp1(CCP_PWM);
  setup_timer_2(T2_DIV_BY_1|T2_CLK_INTERNAL,255,1);
  setup_timer_1(T1_internal|T1_DIV_BY_8);
  set_pwm1_duty(0);
  for(;;){

    set_pwm1_duty(pwm);
    suma=0;
    set_adc_channel(2);
    for(i=0;i<40;i++){
      suma=suma+(int32)read_adc();
      delay_us(100);
    }
    voltaje_adc=(int16)suma/40;


    suma=0;
    set_adc_channel(20);
    for(i=0;i<40;i++){
      suma=suma+(int32)read_adc();
      delay_us(100);
    }
    corriente_adc=(int16)suma/40;


    if(c){
      printf("%lu,%lu\n",voltaje_adc,corriente_adc);
      c=0;
    }


 }

}
```

7.2 Banco de preguntas

7.2.1 Módulo de control por fase:

Las preguntas marcadas con asterisco (*) corresponden a la opción correcta.

1. ¿Cuál es la función principal de un circuito de control por fase en electrónica de potencia?

A) Regulación de la corriente de entrada.
B) Control de la potencia activa. *
C) Estabilización de la frecuencia.
D) Modulación de la amplitud.

2. ¿Qué componente se utiliza típicamente en un circuito de control por fase para regular el ángulo de conducción y, por lo tanto, la potencia entregada a una carga en un sistema de electrónica de potencia?

A) Diodo de potencia.
B) Transistor MOSFET.
C) TRIAC. *
D) Capacitor de ajuste.

3. ¿De que dependen los ángulos de disparo máximo y mínimo en un circuito de control por fase?

A) De la naturaleza de la carga.
B) Del componente semiconductor de potencia empleado.
C) Opción A y B.*
D) De la magnitud de la tensión de entrada.

4. ¿Por qué razón no debe usarse un circuito de control por fase con cargas inductivas?

A) Porque las cargas inductivas pueden generar picos de corriente que pueden dañar el circuito de control por fase.
B) Porque las cargas inductivas causan distorsión en la forma de onda de corriente y voltaje, lo que afecta el funcionamiento del circuito de control por fase. *
C) Porque las cargas inductivas no son compatibles con el funcionamiento de un circuito de control por fase.
D) Porque las cargas inductivas pueden generar picos de voltaje inducido que pueden dañar otros dispositivos electrónicos en el sistema eléctrico.

5. ¿Qué es el ángulo de extinción de corriente en un circuito de control por fase?

A) Ángulo en el cual se produce el apagado de los dispositivos de control por fase. *
B) Ángulo en el que se produce el encendido de los dispositivos de control por fase.
C) Ángulo en el que se extingue del flujo de corriente en la carga inductiva.
D) Ángulo en el que se extingue del flujo de corriente en el circuito de control por fase.

6. ¿Para qué se usa la señal de cruce por cero en un circuito de control por fase?

A) Para sincronizar el disparo del Tiristor con la red eléctrica. *
B) Para regular la frecuencia de operación del circuito de control por fase.

C) Para evitar la distorsión armónica en la forma de onda de corriente y tensión.
D) Para proteger los dispositivos electrónicos conectados al sistema.

7. ¿Cuál es la función de un opto TRIAC en un circuito de control por fase?

A) Recibe la señal de cruce por cero para activar el Tiristor
B) Aísla ópticamente la etapa de control de la etapa de potencia del circuito *
C) Controla la corriente que circula por el Tiristor.
D) Apagar el Tiristor.

8. ¿Qué hace la corriente de mantenimiento en un Tiristor?

A) Proporciona energía al Tiristor para su activación.
B) Mantiene al Tiristor en estado de conducción una vez activado. *
C) Regula la corriente que fluye a través del Tiristor.
D) Controla la velocidad de conmutación del Tiristor.

9. ¿De qué depende el tiempo mínimo de encendido de un Tiristor?

A) Del valor de la corriente de disparo. *
B) De la tensión aplicada al Tiristor.
C) De la corriente de mantenimiento del Tiristor.
D) Del tipo de carga conectada al Tiristor.

10. ¿Cuál es una diferencia clave entre un SCR (Rectificador Controlado de Silicio) y un TRIAC?

A) El SCR es un dispositivo bidireccional, mientras que el TRIAC es unidireccional.
B) El SCR puede controlar la corriente en un solo sentido, mientras que el TRIAC puede controlarla en ambos sentidos. *
C) El SCR solo puede operar en modo de bloqueo, mientras que el TRIAC puede operar tanto en modo de bloqueo como de conducción.
D) El SCR tiene tres terminales, mientras que el TRIAC tiene cuatro terminales.

7.2.2 Módulo de control de velocidad de un motor DC:

1. ¿En el contexto de la electrónica de potencia qué es un c*hopper*?

A) Un dispositivo electrónico utilizado para controlar la cantidad de energía entregada a una carga. *
B) Un tipo de motor eléctrico utilizado en aplicaciones de alta potencia.
C) Un componente utilizado para filtrar las fluctuaciones de voltaje en un circuito eléctrico.

D) Un interruptor utilizado para cortocircuitar un circuito en caso de emergencia.

2. ¿Qué tipo de modulación se suele usar en un *chopper* para controlar la velocidad de un motor DC?

A) Modulación de amplitud (AM).
B) Modulación de frecuencia (FM).
C) Modulación de ancho de pulso (PWM). *
D) Modulación de fase (PM).

3. ¿Cuál es la ventaja de utilizar un *chopper* para controlar la velocidad de un motor DC en comparación con un control de voltaje directo?

A) Mayor eficiencia energética. *
B) Mayor simplicidad en el diseño del circuito.
C) Mayor precisión en el control de la velocidad.
D) Mayor durabilidad del motor.

4. ¿Qué función cumple la red *Snubber* en un *chopper* para controlar un motor DC?

A) Proteger el *chopper* de sobre corriente.
B) Limitar la rata de crecimiento de voltaje y corriente en el elemento de conmutación *
C) Proporcionar un camino para la corriente inversa del motor.
D) Estabilizar el voltaje de salida del *chopper*.

5. ¿Cuáles son los aspectos más relevantes para la escogencia del elemento de potencia (elemento de conmutación) en un *chopper*?

A) La capacidad de disipación de calor del componente.
B) Valores máximos de voltaje y corriente soportados por el componente.
C) Frecuencia máxima de operación del componente.
D) Todas las anteriores. *

6. ¿Qué tipo de dispositivo semiconductor se usa como elemento de potencia en un *chopper* para controlar la velocidad de un motor DC?

A) IGCT
B) MOSFET
C) IGBT
D) Todas las anteriores. *

7. ¿Cuál es la función de un optoacoplador en un circuito de control de velocidad con *chopper* para un motor DC?

A) Proporcionar aislamiento óptico entre la señal de control y el circuito de potencia. *
B) Regular la frecuencia de operación del *chopper.*
C) Proteger el motor DC contra sobretensiones.
D) Controlar la velocidad del motor en función de la temperatura ambiente.

8. ¿De qué depende la frecuencia de la señal PWM utilizada para controlar la velocidad de un motor DC utilizando un *chopper*?

A) De las componentes utilizadas en el circuito del *chopper*.
B) De las características intrínsecas del motor.
C) Opciones A y B.*
D) Ninguna de las anteriores.

9. ¿De qué depende la selección de los componentes que conforman la red *Snubber* de un *chopper* para controlar la velocidad de un motor DC?

A) De la marca del fabricante de los componentes.
B) Del tipo de carga conectada al motor.
C) De la frecuencia de operación del *chopper*. *
D) De la capacidad de disipación de calor del *chopper*.

10. ¿Qué podría pasar si la frecuencia de una señal PWM utilizada para controlar la velocidad de un motor DC utilizando un *chopper* es muy baja?

A) Podría generarse un ruido audible molesto debido a que el motor entra en resonancia con la señal de alimentación. *
B) La eficiencia del sistema podría aumentar.
C) El *chopper* podría sobrecalentarse.
D) Ninguna de las anteriores.

7.2.3 Módulo convertidor DC-DC tipo *buck*:

1. ¿Qué tipo de pérdidas de potencia introduce un convertidor DC-DC tipo *buck*?

A) Pérdidas por conmutación.
B) Pérdidas por efecto Joule en el diodo
C) Pérdidas por efecto Joule en el inductor
D) todas las anteriores. *

2. ¿En la escogencia del elemento de potencia (IGBT o MOSFET) para un convertidor DC-DC tipo *buck*, qué criterios se establecen para lograr una alta confiabilidad de operación en corriente y voltaje?

A) Voltaje de ruptura y velocidad de conmutación.
B) Tolerancia a la temperatura y frecuencia de operación.
C) Disipación de calor y capacidad de corriente máxima.
D) Opciones A y C*

3. ¿Cuál es la diferencia principal entre un convertidor DC-DC tipo *buck* y uno tipo *boost?*

A) El convertidor *buck* reduce el voltaje de entrada, mientras que el convertidor *boost* aumenta el voltaje de entrada. *
B) El convertidor *buck* aumenta el voltaje de entrada, mientras que el convertidor *boost* reduce el voltaje de entrada.
C) Ambos tipos de convertidores reducen el voltaje de entrada, pero el *buck* lo hace de manera más eficiente.
D) Ambos tipos de convertidores aumentan el voltaje de entrada, pero el *boost* lo hace de manera más eficiente.

4. Si el filtro LC de un convertidor DC-DC tipo *buck* es resonante a la frecuencia de muestreo, ¿de qué orden son los armónicos que este elimina?

A) Elimina los armónicos impares.
B) Elimina los armónicos pares. *
C) Elimina los armónicos de cualquier orden.
D) No elimina ningún armónico.

5. ¿Cómo influye la frecuencia de operación en el cálculo de los valores del filtro LC?

A) A mayor frecuencia de operación, se requiere un inductor con mayor valor de inductancia y un condensador con menor valor de capacitancia para obtener la misma reactancia deseada.
B) La frecuencia de operación no tiene un impacto significativo en el cálculo de los valores del filtro LC.
C) A mayor frecuencia de operación, el tamaño del filtro LC suele aumentar por la mayor necesidad de inductancia y capacitancia.
D) La frecuencia de operación determina la frecuencia de corte del filtro LC, la cual a su vez influye en la selección de la inductancia (L) y la capacitancia (C). *

6. ¿Cuál es el propósito principal del diodo en un convertidor *buck*?

A) Controlar la corriente de salida.
B) Almacenar energía.
C) Proporcionar un camino para la corriente cuando el transistor está apagado. *
D) Regular el ciclo de trabajo.

7. ¿Qué significa el término "ciclo de trabajo" (d*uty cycle*) en un convertidor DC-DC tipo *buck*?
A) La frecuencia de conmutación del transistor de conmutación.
B) El tiempo que el transistor de conmutación está encendido en un período de conmutación. *
C) La relación entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida.
D) La cantidad de corriente que puede manejar el inductor.

8. El inductor en un convertidor DC-DC tipo *buck* almacena energía durante:
A) La fase de conducción del transistor. *
B) La fase de bloqueo del transistor.
C) Ambas fases: conducción y bloqueo del transistor.
D) No almacena energía.

9. La eficiencia de un convertidor DC-DC tipo *buck* depende de:

A) La tensión de entrada.
B) La inductancia del inductor.
C) El ciclo de trabajo del elemento de conmutación
D) Las pérdidas en los componentes del convertidor. *

10. Una de las principales ventajas de los convertidores DC-DC tipo *buck* es:

A) Su simplicidad de diseño. *
C) Su alta eficiencia.
C) Su capacidad para manejar altos voltajes de salida.
D) Su capacidad para operar en un amplio rango de frecuencias.

8. Referencias

[1] A. A. Benattia, M. Moussa, A. Benachenhou, and A. Mebrouka, "Design of a low cost switching board enabling a reconfigurable remote experiment," *International journal of online and biomedical engineering*, vol. 15, no. 12, pp. 32–41, 2019, doi: 10.3991/ijoe.v15i12.10650.

[2] I. Georgakopoulos, D. Piromalis, S. Ntanos, V. Zakopoulos, and P. Makrygiannis, "A Prediction Model for Remote Lab Courses Designed upon the Principles of Education for Sustainable Development," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 6, Mar. 2023, doi: 10.3390/su15065473.

[3] "Analog Discovery 2 - Digilent Reference." Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery-2/start

[4] R. Sudha and D. Murali, "Low-Cost Real-Time Design and Implementation of Phasor Measurement Unit using Analog Discovery," *Microprocess Microsyst*, vol. 76, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103102.

[5] K. Herrrera, W. Ludena, P. Velarde, and M. Moya, "Study of Energy Behavior and Mathematical Modeling of the Didactic Plant Lab Volt 46801-32," in *Proceedings - 2019 International Conference on Information Systems and Computer Science, INCISCOS 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2019, pp. 251–258. doi: 10.1109/INCISCOS49368.2019.00047.

[6] M. Barrio Andrés, *Internet de las Cosas*, 1st ed. España: REUS, 2018.

[7] N. A. Yalcin and F. Vatansever, "A web-based virtual power electronics laboratory," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 24, no. 1, pp. 71–78, 2016, doi: 10.1002/cae.21673.

[8] Institute of Electrical and Electronics Engineers., *2012 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE) : proceedings.* IEEE, 2012.

[9] *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering.* IEEE, 2011.

[10] J. Garcia-Zubía *et al.*, "Empirical Analysis of the Use of the VISIR Remote Lab in Teaching Analog Electronics," *IEEE Transactions on Education*, pp. 1–8, 2016.

[11] V. Ansal *et al.*, "Remote triggered lab for buck converter using lab view," *Journal of Critical Reviews*, vol. 6, no. 6, pp. 219–224, 2019, doi: 10.22159/jcr.06.06.30.

[12] "Estación de Laboratorio de Ingeniería - NI." Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: https://www.ni.com/es-co/shop/category/engineering-lab-stations.html?productId=134146

[13] "LabVolt Series by Festo Didactic - Our Solutions - Electronics." Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: https://labvolt.festo.com/Website/solutions/2_electronics

[14] “LabVolt Series by Festo Didactic - FACET® Electronics Training System (91000-00).” Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: https://labvolt.festo.com/solutions/2_electronics/98-91000-00_facet_electronics_training_system

[15] F. Luthon and B. Larroque, “LaboREM - A Remote Laboratory for Game-Like Training in Electronics,” *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 311–321, 2015, doi: 10.1109/TLT.2014.2386337.

[16] B. Letowski, C. Lavayssière, B. Larroque, M. Schröder, and F. Luthon, “A fully open source remote laboratory for practical learning,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 11, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/electronics9111832.

[17] D. D. Amaudov and E. O. Dudin, “Distance learning and remote laboratory exercises on power supply systems,” *11th National Conference with International Participation, ELECTRONICA 2020 - Proceedings*, pp. 17–20, 2020, doi: 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305156.

[18] F. Y. Limpraptono and E. Nurcahyo, “The Development of Electronics Telecommunication Remote Laboratory Architecture Based on Mobile Devices,” *International journal of online and biomedical engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 26–36, 2021, doi: 10.3991/ijoe.v17i03.20179.

[19] “Red Pitaya | Swiss Army Knife For Engineers.” Accessed: Oct. 10, 2021. [Online]. Available: https://redpitaya.com/

[20] K. Przybyla, K. Frania, M. Stepien, and M. Kasprzak, “Educational Platform for Remote Power Electronics Laboratory Classes,” in *2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 311–314. doi: 10.1109/PEMC51159.2022.9962859.

[21] “WaveForms Software FREE Download - Digilent.” Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: https://digilent.com/shop/software/digilent-waveforms/

[22] R. Sum, W. Suwansantisuk, and P. Kumhom, “Remote field-programmable gate array laboratory for signal acquisition and design verification,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 2344–2360, Apr. 2024, doi: 10.11591/ijece.v14i2.pp2344-2360.

[23] “FPGA: qué es, características técnicas y utilidades.” Accessed: Oct. 08, 2021. [Online]. Available: https://hardzone.es/reportajes/que-es/fpga-caracteristicas-utilidad/

[24] J. Bermejo Vera, *Internet de las cosas (2a. ed.)*. Editorial Reus, 2020.

[25] A. K. Sikder, G. Petracca, H. Aksu, T. Jaeger, and A. S. Uluagac, “A Survey on Sensor-based Threats to Internet-of-Things (IoT) Devices and Applications,” Feb. 2018, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/1802.02041

[26] S. Madakam, R. Ramaswamy, and Siddarth. Tripathi, “Internet of Things (IoT): A Literature Review,” *Journal of Computer and Communications*, vol. 3, pp. 164–163, May 2015.

[27] Wayne. Tomasi, G. Mata Hernández, and Virgilio. García Bisogno, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson Educación, 2003.

[28] B. Kang and H. Choo, “An experimental study of a reliable IoT gateway,” *ICT Express*, vol. 4, no. 3, pp. 130–133, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.icte.2017.04.002.

[29] S. A. Marchenkov, D. A. Korzun, A. I. Shabaev, and A. V. Voronin, “On applicability of wireless routers to deployment of smart spaces in Internet of Things environments,” *9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, pp. 1000–1005, Sep. 2017, doi: 10.1109/IDAACS.2017.8095237.

[30] J. Á. Ariza and H. Baez, “Understanding the role of single-board computers in engineering and computer science education: A systematic literature review,” *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 30, no. 1, pp. 304–329, Jan. 2022, doi: 10.1002/cae.22439.

[31] J. Macias *et al.*, “Universidad Distrital Francisco José de Caldas-Facultad Tecnológica. e implementación de un Gateway IoT multiprotocolo,” *Revista Vínculos*, vol. 18, no. 1, pp. 72–84, 2021, doi: 10.14483/2322939X.20188.

[32] J. Dordoigne, *Nociones fundamentales (protocolos, arquitecturas, redes inalámbricas, virtualización, seguridad, IP v6...)*. España: Ediciones ENI, 2018.

[33] J. O. Agyemang, J. J. Kponyo, J. D. Gadze, H. Nunoo-Mensah, and D. Yu, “A Lightweight Messaging Protocol for Internet of Things Devices,” *Technologies (Basel)*, vol. 10, no. 1, Feb. 2022, doi: 10.3390/technologies10010021.

[34] D. Garcia-Carrillo and R. Marin-Lopez, “Lightweight CoAP-based bootstrapping service for the internet of things,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 3, Mar. 2016, doi: 10.3390/s16030358.

[35] J. de Carvalho Silva, J. J. P. C. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic, and A. L. L. Aquino, “LoRaWAN — A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities,” in *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, 2017, pp. 1–6.

[36] B. De, *API Management*. Apress, 2017. doi: 10.1007/978-1-4842-1305-6.

[37] “Node-RED.” Accessed: Sep. 28, 2022. [Online]. Available: https://nodered.org/

[38] Muhammad H. Rashid, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones - Muhammad H. Rashid - Google Libros*, 3rd ed. México: Pearson, 2014.

[39] European Power Electronics and Drives Association, Politechnika Poznańska, International Power Electronics and Motion Control Conference 13 2008.09.01-03 Poznań, and EPE-PEMC 13 2008.09.01-03 Poznań, *13th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2008 EPE-PEMC 2008 ; 1-3 Sept. 2008, [Poznań, Poland ; proceedings]*.

[40] S. A. Lopa, S. Hossain, M. K. Hasan, and T. K. Chakraborty, “Design and Simulation of DC-DC Converters,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2015, [Online]. Available: www.irjet.net

[41] IEEE Power Electronics Society, Annual IEEE Computer Conference, IEEE Industry Applications Conference, Ga. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition 2 2010.09.12-16 Atlanta, Ga. ECCE 2 2010.09.12-16 Atlanta, and Ga. Annual IEEE Energy Conversion Conference and Exhibition 2 2010.09.12-16 Atlanta, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 12-16 Sept. 2010, Atlanta, Georgia*.

[42] N. GómezTejera, “Diseño e implementación de un inversor variador DC-AC,” Universidad de la Laguna, España, 2017.

[43] A. M. Nasser, A. Refky, H. Shatla, and A. M. Abdel-hamed, “A grey wolf optimization-based modified SPWM control scheme for a three-phase half bridge cascaded multilevel inverter,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-57262-0.

[44] A. T. Alejandro and P. R. Javier Beristain J José Antonio, “Inversor trifásico SPWM para el control de velocidad de un motor de inducción implementado en el microcontrolador PIC18F2431,” 2006.

[45] N. Mohan, ToreM. Undeland, and W. P. Robbins, *Electrónica de potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño*, 3rd ed. México: Mc Graw Hill, 2009.

[46] “Símbolos de Tiristores, Triacs y Diacs.” Accessed: Apr. 17, 2024. [Online]. Available: https://www.simbologia-electronica.com/simbolos-electricos-electronicos/simbolos-tiristores-triac-diac.htm

[47] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed. Reino Unido: Cambridge University Press, 2015.

[48] “Buster - the new version of Raspbian - Raspberry Pi.” Accessed: May 26, 2024. [Online]. Available: https://www.raspberrypi.com/news/buster-the-new-version-of-raspbian/

[49] “Eclipse Mosquitto.” Accessed: May 26, 2024. [Online]. Available: https://mosquitto.org/

[50] MICROCHIP, “PIC12F1822 | Microchip Technology.” Accessed: May 28, 2024. [Online]. Available: https://www.microchip.com/en-us/product/pic12f1822

[51] “In-Circuit Serial Programming ™ (ICSP ™) Guide,” 2003.

[52] “Products - Qingxian Zeming Langxi Electronic Devices Co., Ltd.” Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: https://www.micro-transformer.com/phoenix/admin/prod/search?searchValue=ZMPT101B&searchProdStyle=

[53] “Keyword and Part Number Search Results | Vishay.” Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: https://www.vishay.com/search/?searchChoice=part&query=6N136

[54] “CD4011B data sheet, product information and support | TI.com.” Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: https://www.ti.com/product/CD4011B?keyMatch=&tisearch=search-everything&usecase=partmatches

[55] “Keyword and Part Number Search Results | Vishay.” Accessed: May 04, 2024. [Online]. Available: https://www.vishay.com/search/?searchChoice=part&query=IRF840

[56] R. Severns, “Snubber Circuits For Power Electronics,” 2012.

[57] G. E. Mejía, N. Muñoz, and J. B. Cano, “Procedimiento novedoso para el diseño del circuito amortiguador RCD (snubber RCD) y deducción matemática de las ecuaciones,” *Informacion Tecnologica*, vol. 26, no. 2, pp. 117–128, 2015, doi: 10.4067/S0718-07642015000200014.

[58] “E6B2-CWZ6C 1000P/R 0.5M OMS | OMRON, España.” Accessed: May 04, 2024. [Online]. Available: https://industrial.omron.es/es/products/E6B2-CWZ6C-1000P-R-0-5M

[59] M. H. Rashid, *Electrónica de Potencia*, 3rd ed. México: PEARSON, 2004.

[60] “ACPL-7900-000E.” Accessed: May 22, 2024. [Online]. Available: https://www.broadcom.com/products/optocouplers/industrial-plastic/isolation-amplifiers-modulators/isolation-amplifiers/acpl-7900-000e

[61] “Hoja de datos de LM358, información de producto y soporte | TI.com.” Accessed: May 22, 2024. [Online]. Available: https://www.ti.com/product/es-mx/LM358

[62] Allegro Microsystems, “Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor.” Accessed: May 22, 2024. [Online]. Available: https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/zero-to-fifty-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs712

[63] “ULN2003 - Seven Darlington Arrays - STMicroelectronics.” Accessed: May 24, 2024. [Online]. Available: https://www.st.com/en/interfaces-and-transceivers/uln2003.html

[64] “Buy a Raspberry Pi 4 Model B – Raspberry Pi.” Accessed: Sep. 27, 2022. [Online]. Available: https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/

[65] “PuTTY - a free SSH and telnet client for Windows.” Accessed: May 31, 2024. [Online]. Available: https://www.putty.org/

[66] T. Ylonen and C. Lonvick, “Network Working Group,” Jan. 2006.